



B&B
VIŠJA STROKOVNA ŠOLA

Diplomsko delo višješolskega strokovnega študija
Program: Strojništvo
Modul: Orodjarstvo

**ANALIZA MEHANSKE ZASNOVE
POLNILNE POSTAJE ZA ELEKTRIČNA
VOZILA IN PREDLOGI
IZBOLJŠAV**

Mentorica: dr. Lidija Rihar

Kandidat: Janez Gašperlin

Lektorica: Nina Korošec, univ. dipl. slov.

Ljubljana, oktober 2025

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorici dr. Lidiji Rihar za pomoč, usmeritve in ažurnost pri izdelavi diplomskega dela.

Zahvaljujem se tudi lektorici ge. Nini Korošec, ki je moje diplomsko delo jezikovno in slovnično pregledala.

Posebno bi se rad zahvalil ženi Tadeji in vsem mojim najbližjim, ki so mi pomagali in mi nudili podporo med študijem.

IZJAVA

Študent Janez Gašperlin izjavljam, da sem avtor tega diplomskega dela, ki sem ga napisal pod mentorstvom dr. Lidije Rihar.

Skladno s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorski in sorodnih pravicah dovoljujem objavo tega diplomskega dela na spletni strani šole.

Dne: _____

Podpis: _____

POVZETEK

Diplomsko delo obravnava mehansko zasnovo polnilnih postaj za električna vozila z vidika tehničnih, uporabniških in trajnostnih meril. Namen raziskave je bil ugotoviti, kako so obstoječe polnilnice v Sloveniji zasnovane in v kolikšni meri ustrezajo sodobnim zahtevam ter smernicam za kakovostno in varno uporabo. Cilj dela je bil poiskati rešitve, ki bi prispevale k večji zanesljivosti, trajnosti in uporabni prijaznosti naprav.

V teoretičnem delu so bili predstavljeni ključni standardi in smernice, ki določajo mehansko, varnostno in ergonomsko zasnovo polnilnih postaj. Empirični del je temeljil na terenskem opazovanju in analizi več primerov polnilnic v Ljubljani in okolici. Rezultati so pokazali, da so med posameznimi proizvajalci razlike v kakovosti materialov, odpornosti konstrukcij in dostopnosti za uporabnike.

Na podlagi ugotovitev so bili oblikovani predlogi za izboljšave mehanske zasnove, kot so uporaba trpežnejših materialov, večja zaščita ohišij, modularna zasnova in boljša prilagoditev uporabnikom. Predlagane rešitve prispevajo k večji trajnosti, varnosti in funkcionalnosti polnilne infrastrukture ter spodbujajo razvoj trajnostne mobilnosti v Sloveniji.

KLJUČNE BESEDE

- mehanska zasnova
- polnilna postaja
- električna vozila
- trajnost
- uporabniška izkušnja

SUMMARY

The thesis focuses on the mechanical design of electric vehicle charging stations, considering technical, user-oriented, and sustainability aspects. The main objective was to analyse existing charging stations in Slovenia and determine to what extent they meet modern standards and design requirements for safe and efficient operation. The goal was to propose solutions that improve the reliability, durability, and user accessibility of the stations.

The theoretical part presents key standards and guidelines that define the mechanical, safety, and ergonomic design of charging infrastructure. The empirical part is based on field observation and analysis of several charging stations in Ljubljana and the surrounding area. The results showed notable differences between manufacturers in terms of material quality, structural resistance, and user accessibility.

Based on these findings, several improvements were proposed, including the use of more durable materials, better protection of housings, modular construction, and improved user-friendly design. The proposed solutions contribute to safer, more durable, and sustainable charging infrastructure, supporting the further development of environmentally responsible mobility in Slovenia.

KEYWORDS

- mechanical design
- charging station
- electric vehicles
- sustainability
- user experience

KAZALO

1 UVOD	1
1.1 Predstavitev problema	1
1.2 Cilji naloge	1
1.3 Raziskovalna vprašanja	2
1.4 Predpostavke in omejitve	2
1.5 Metodologija dela	3
1.6 Pomen raziskave	3
1.7 Konceptualni okvir	4
2 TEORETIČNE OSNOVE	5
2.1 Polnilna infrastruktura za električna vozila – pregled in pomen	5
2.2 Standardi in predpisi za mehansko zasnovo polnilnih postaj	5
2.3 Materiali in odpornost na zunanje vplive	6
2.4 Ergonomija v oblikovanju polnilnih postaj	6
2.5 Konstrukcijska zanesljivost in vzdržljivost	7
2.6 Trajnost in ekonomika življenjskega cikla	7
2.7 Primeri dobrih praks v tujini	8
3 OBSTOJEČE STANJE	9
3.1 Pregled obstoječega stanja polnilne infrastrukture	9
3.2 Mehanske značilnosti izbranih proizvajalcev	9
3.3 Primerjalna analiza konstrukcijskih rešitev	10
3.4 Pomen ergonomije, varnosti in vzdrževanja	12
3.5 Povzetek ugotovitev	12
4 PRAKTIČNI DEL	14
4.1 Uvod v praktični del	14
4.2 Terenska analiza polnilnic	14
4.2.1 ABB	14
4.2.2 Siemens	15
4.2.3 Etrek	15
4.2.4 Tesla Supercharger	16
4.2.5 Ionity	16
4.3 Primer domače prakse – Petrol	16
5 ANALIZA IN PRIMERJAVA REZULTATOV	18
5.1 Primerjava konstrukcijskih rešitev	18
5.2 Primerjalna tabela uporabljenih materialov in konstrukcijskih lastnosti	25
5.3 Odpornost na mehanske obremenitve in vremenske vplive	25
5.4 Ergonomija in uporabniška izkušnja	26
6 PREDLOGI IZBOLJŠAV MEHANSKE ZASNOVE	28
6.1 Empirični predlogi in rezultati	28
6.2 Konstrukcijske izboljšave za večjo trajnost	28
6.3 Rešitve za izboljšanje ergonomije in varnosti uporabnikov	29

6.4 Predlogi zaščite pred vandalizmom in vremenskimi vplivi	29
6.5 Priporočila za implementacijo in nadaljnje delo	29
6.5.1 KPI-ji in ciljne vrednosti	29
6.5.2 Skladnost s standardi in načela zasnove	31
6.5.3 Faze implementacije.....	31
6.5.4 Ekonomska utemeljitev (TCO).....	32
6.5.5 Register tveganj	34
6.5.6 Organizacija in poročanje	34
6.5.7 Validacija.....	34
6.5.8 Sklep	35
6.6 Povzetek predlaganih rešitev	35
7 ZAKLJUČEK	36
7.1 Kritično vrednotenje doseganja ciljev	36
7.2 Odgovori na raziskovalna vprašanja	37
7.3 Kritična evalvacija osnovnih predpostavk	39
7.4 Glavne ugotovitve in njihova kritična umestitev	40
7.5 Predlagane rešitve in njihova uporabnost.....	40
7.6 Omejitve in izzivi pri implementaciji	41
7.7 Dodana vrednost in dolgoročni učinek.....	42
7.8 Slabosti, ki so se pokazale	43
7.9 Zaključna refleksija	43
8 LITERATURA IN VIRI.....	45

KAZALO SLIK

Slika 1: Polnilna postaja ABB Terra 53 CJG (Ljubljana – Lidl)	19
Slika 2: Identifikacijska ploščica ABB polnilne postaje (model Terra 53 CJG) v Ljubljani)	19
Slika 3: Etrelova AC polnilna postaja pri Petrolu v Ljubljani	29
Slika 4: Wallbox polnilna postaja Supernova Fast Charger v Ljubljani	29
Slika 5: Wallbox identifikacijska ploščica v Ljubljani.....	30
Slika 6: Sodobna DC polnilna postaja z LED osvetlitvijo (Ljubljana)	21
Slika 7: Polnilna postaja Efacec QC45 (Ljubljana).....	22
Slika 8: Siemens VersiCharge DC/Ultra polnilnica.....	22
Slika 9: Tesla Supercharger – celoten pogled polnilne postaje (Ljubljana)	23
Slika 10: Tesla Supercharger – pogled na priklopni vmesnik (Ljubljana)	23
Slika 11: Ionity HPC polnilna postaja (literaturni primer)	24
Slika 12: Prikaz napake pri polnjenju električnega vozila Renault Zoe	26
Slika 13: Uptime po fazah.....	30
Slika 14: Delež neuspehov zaradi poškodovanih/manjkajočih kablov	31
Slika 15: Letni izpad delovanja (ure) po scenarijih – 12 mesecev (primer).....	32
Slika 16: TCO (vzdrževanje + izpad) po scenarijih – 12 mesecev (primer).....	33

KAZALO TABEL

Tabela 1: konstrukcijski parametri	11
Tabela 2: Primerjava konstrukcijskih rešitev polnilnic	18
Tabela 3: Analiza prednosti in slabosti polnilnic (ABB, Siemens, Etre)	25
Tabela 4: KPI - Izhodišča in cilji.....	30
Tabela 5: TCO – primerjava scenarijev (12 mesecev)	33
Tabela 6: Register tveganj.....	34

KRATICE IN AKRONIMI

AFIR:	Uredba o infrastrukturi za alternativna goriva (angl. Alternative Fuels Infrastructure Regulation)
DfD:	Mednarodna elektrotehnična komisija (angl. International Electrotechnical Commission)
EU:	Evropska unija (angl. European Union)
EV:	Električno vozilo (angl. Electric Vehicle)
IEC:	Mednarodna elektrotehnična komisija (angl. International Electrotechnical Commission)
IP:	Stopnja zaščite pred vdorom delcev in tekočin (angl. Ingress Protection)
IK:	Stopnja mehanske odpornosti ohišja (angl. Impact Protection)
ISO:	Mednarodna organizacija za standardizacijo (angl. International Organization for Standardization)
LCA:	Ocena življenjskega cikla (angl. Life Cycle Assessment)
LCC:	Stroški življenjskega cikla (angl. Life Cycle Cost)
MTTR:	Povprečni čas popravila (angl. Mean Time To Repair)
RAMS:	Zanesljivost, razpoložljivost, vzdrževanje, varnost (Reliability, Availability, Maintainability, Safety)
TCO:	Skupni stroški lastništva (angl. Total Cost of Ownership)
UNEP:	Program Združenih narodov za okolje (angl. United Nations Environment Programme)

1 UVOD

1.1 Predstavitev problema

Razvoj elektromobilnosti je v zadnjem desetletju postal ena ključnih smernic trajnostnega razvoja v Evropski uniji in svetu. Električna vozila (EV) predstavljajo tehnološko rešitev za zmanjšanje emisij toplogrednih plinov, hrupa in onesnaženosti urbanih okolij (European Commission, 2024). Vendar pa je širša uveljavitev elektromobilnosti neposredno odvisna od kakovostno načrtovane in mehansko zanesljive polnilne infrastrukture.

Polnilne postaje za električna vozila niso le električne naprave, temveč celoviti tehnično-mehanski sistemi, ki morajo zagotoviti varnost uporabnikov, odpornost na zunanje vplive in enostavno vzdrževanje. Po podatkih Regulation (EU) 2023/1804 on the deployment of alternative fuels infrastructure (AFIR) mora biti do leta 2030 zagotovljeno, da se medsebojna interoperabilnost, dostopnost in standardizacija polnilnih mest izvajajo na enotni tehnični osnovi v vseh državah članicah EU (European Commission, 2023).

Slovenija sledi evropskim ciljem z nacionalnimi razvojnimi strategijami, ki jih vodijo Ministrstvo za okolje, podnebje in energijo (MOPE), Borzen in SODO. Ti dokumenti poudarjajo potrebo po povečanju energetske učinkovitosti in trajnostnem umeščanju infrastrukture v prostor (Borzen, 2024; MOPE, 2024; SODO, 2024).

Kljub napredku pa številni izzivi ostajajo – od pomanjkljivega mehanskega načrtovanja, neustrezne zaščite pred vandalizmom in vremenskimi vplivi, do nezadostne uporabniške ergonomije. Namen tega diplomskega dela je raziskati, kako mehanska zasnova polnilne postaje vpliva na njeno zanesljivost, varnost in trajnost, ter oblikovati predloge za izboljšave na teh področjih.

1.2 Cilji naloge

Glavni namen diplomskega dela je bil analizirati mehansko zasnovo polnilnih postaj za električna vozila v slovenskem prostoru ter opredeliti možnosti za izboljšave, ki bi prispevale k večji zanesljivosti, varnosti, trajnosti in uporabniški prijaznosti naprav.

V okviru zastavljenega namena so bili oblikovani naslednji cilji:

- Preučiti tehnične in zakonodajne okvire, ki določajo mehansko in varnostno zasnovo polnilnih postaj, s poudarkom na evropski uredbi AFIR (EU 2023/1804) (European Commission, 2023) ter standardih IEC in ISO, ki urejajo področje električne in mehanske varnosti.
- Analizirati obstoječe polnilnice v Sloveniji – predvsem na območju Ljubljane in okolice – z vidika uporabljenih materialov, konstrukcijskih rešitev, zaščite, dostopnosti in ergonomije, ter oceniti njihovo skladnost s sodobnimi smernicami in standardi.

- Oceniti prednosti in pomanjkljivosti ugotovljenih mehanskih rešitev ter s pomočjo primerjalne analize izpostaviti ključne dejavnike, ki vplivajo na trajnost, varnost in uporabniško izkušnjo.
- Oblikovati konkretne predloge za izboljšave mehanske zasnove polnilnih postaj, ki temeljijo na uporabi trajnejših materialov, modularni zgradbi, višji stopnji zaščite ohišij ter boljši prilagoditvi različnim uporabniškim skupinam.
- Poudariti pomen mehanske zasnove pri razvoju trajnostne mobilnosti ter njen vpliv na celoten življenjski cikel naprave – od proizvodnje do vzdrževanja in razgradnje – v skladu z načeli krožnega gospodarstva.

Končni cilj je pripraviti strokovno podlago, ki bi lahko služila kot referenčni model pri nadaljnjem razvoju mehanskih rešitev za polnilne postaje v Sloveniji.

1.3 Raziskovalna vprašanja

Da bi bil namen raziskave dosežen, so bila oblikovana naslednja raziskovalna vprašanja:

1. Kako mehanska zasnova vpliva na zanesljivost, varnost in trajnost polnilnih postaj?
2. Katere mednarodne smernice in standardi določajo osnovne zahteve mehanske izvedbe polnilnic?
3. Kako se slovenske prakse načrtovanja in umeščanja polnilnic primerja s tujimi?
4. Katere konstrukcijske rešitve bi omogočile daljšo življenjsko dobo in nižje stroške vzdrževanja?
5. Kako vključiti načela trajnosti in krožnega gospodarstva v mehansko zasnovo EV infrastrukture?

Odgovori na ta vprašanja bodo omogočili boljše razumevanje vloge mehanske konstrukcije pri razvoju polnilne infrastrukture in s tem posredno vplivali na trajnostno mobilnost.

1.4 Predpostavke in omejitve

Raziskava temelji na predpostavki, da mehanska konstrukcija pomembno vpliva na zanesljivost in uporabnost polnilne postaje. Upošteva se, da so vsi analizirani primeri skladni z osnovnimi varnostnimi standardi IEC in ISO ter da se mehanski vplivi (vreme, vandalizem, UV-sevanje) pojavljajo v realnih pogojih uporabe.

Omejitve raziskave izhajajo predvsem iz obsega empiričnih podatkov. Terenski pregled je omejen na območje Ljubljane in osrednje Slovenije, kar pomeni, da rezultati ne odražajo vseh geografskih pogojev. Prav tako električne in elektronske

komponente niso predmet podrobne analize, saj je poudarek namenjen mehanskemu vidiku konstrukcije.

Dodatna omejitev je povezana z dostopnostjo tehnične dokumentacije proizvajalcev (ABB, Siemens, EVBox), ki pogosto ni javno objavljena. Kljub temu je mogoče z analizo razpoložljivih podatkov, standardov in praktičnih primerov oblikovati pomembne zaključke.

1.5 Metodologija dela

Raziskava temelji na kombinaciji deskriptivne, primerjalne in analitične metode. V prvem delu je bila izvedena analiza strokovne literature, evropskih in mednarodnih standardov ter smernic s področja mehanske zasnove polnilnih postaj (IEC, ISO, AFIR).

V drugem delu je bila opravljena primerjalna analiza več izbranih modelov polnilnih postaj različnih proizvajalcev s poudarkom na mehanskih značilnostih, uporabljenih materialih in rešitvah za zaščito ter vzdrževanje.

Empirični del temelji na opazovanju, tehničnem vrednotenju in primerjavi konstrukcij, dopolnjenimi s pregledom tehničnih listov in katalogov proizvajalcev (ABB, Siemens, EVBox).

V metodologijo je vključena tudi uporaba LCC (Life Cycle Cost) in TCO (Total Cost of Ownership) pristopov za oceno ekonomske učinkovitosti konstrukcije. Za oblikovanje zaključkov so uporabljene metode sinteze in interpretacije rezultatov s ciljem izluščiti smernice za izboljšave mehanskih rešitev v praksi.

1.6 Pomen raziskave

Raziskava ima pomembno vlogo pri razumevanju, kako mehanska zasnova vpliva na zanesljivost in uporabniško izkušnjo polnilnih postaj za električna vozila. V okviru hitro razvijajoče se elektromobilnosti mehanski vidik pogosto ostaja zapostavljen v primerjavi z električnim ali programskim delom sistema (Tektronix, n.d.). Vendar so prav mehanske lastnosti – odpornost, stabilnost, ergonomija in dostopnost – ključne za varno in dolgotrajno delovanje naprave.

Pomen raziskave je tudi v podpori trajnostnim ciljem Agende 2030 in evropskemu zelenemu prehodu. Z izboljšanjem mehanske konstrukcije polnilnic lahko zmanjšamo količino odpadkov, porabo materialov, zagotovimo lažje vzdrževanje in popravila, kar prispeva k načelom krožnega gospodarstva v United Nations Environment Programme, Life Cycle Initiative (UNEP, 2020).

Rezultati diplomskega dela so zato uporabni tako za načrtovalce in proizvajalce kot tudi za upravljavce polnilne infrastrukture in javne investitorje.

1.7 Konceptualni okvir

Teoretično izhodišče diplomskega dela temelji na štirih ključnih konceptih:

- Trajnost in življenjski cikel (LCC, TCO) – celovita ocena stroškov in okoljskih vplivov naprave od izdelave do odlaganja (ABB, 2024b; UNEP Life Cycle Initiative 2020).
- RAMS pristop (Reliability, Availability, Maintainability, Safety) – sistemska metodologija za načrtovanje zanesljivih in varnih tehničnih sistemov (ResearchGate, 2020).
- Ergonomija in uporabniška dostopnost – oblikovanje naprav, ki omogočajo varno in udobno uporabo za različne skupine uporabnikov (ISO, 2002).
- Mednarodni standardi in zakonodajni okvir (IEC, AFIR) – tehnični in pravni temelji, ki zagotavljajo skladnost in interoperabilnost naprav na evropski ravni (European Commission, 2023; IEC, 2017a).

Ti koncepti so med seboj povezani in tvorijo osnovo za analizo mehanske zasnove polnilne postaje ter razvoj predlogov izboljšav, ki temeljijo na standardiziranem, trajnostnem in uporabniško usmerjenem pristopu.

Uvodno poglavje tako povzema potrebo po celovitem pristopu k razvoju polnilne infrastrukture za električna vozila, kjer ima mehanska zasnova ključno vlogo pri zagotavljanju varnosti, trajnosti in uporabnosti.

Zaradi vse večjih zahtev po energetske učinkovitosti in trajnostnem razvoju bodo mehanske rešitve prihodnosti morale temeljiti na modularnosti, krožnosti materialov in standardiziranih principih RAMS.

Raziskava, predstavljena v tem delu, prispeva k boljšemu razumevanju teh izzivov ter ponuja usmeritve za nadaljnje načrtovanje in izvedbo kakovostne, trajnostne in uporabniku prijazne polnilne infrastrukture v Sloveniji in širše.

2 TEORETIČNE OSNOVE

2.1 Polnilna infrastruktura za električna vozila – pregled in pomen

Polnilna infrastruktura predstavlja enega ključnih temeljev razvoja trajnostne mobilnosti. Omogoča prehod na električna vozila (EV) in s tem zmanjšanje emisij toplogrednih plinov, hrupa ter odvisnosti od fosilnih goriv. Kot poudarjata Kroke in Jesih (2018), je elektromobilnost več kot le tehnološka inovacija – predstavlja strateško preobrazbo energetskega in prometnega sistema, ki zahteva razvoj ustrezne infrastrukture, pametnih omrežij in novih poslovnih modelov. Po podatkih Evropske komisije je cilj uredbe AFIR (EU 2023/1804) zagotoviti, da bodo do leta 2030 po vsej Evropski uniji na voljo dostopne, interoperabilne in energetske učinkovite polnilne postaje (European Commission, 2023).

Polnilna infrastruktura zajema vse tehnične in infrastrukturne elemente, potrebne za prenos energije iz elektroenergetskega omrežja v električno vozilo – od priključnega kabla in vtiča do varnostnih mehanizmov, programske podpore in mehanske zasnove same postaje. Mehanska konstrukcija ima pri tem bistveno vlogo, saj mora zagotavljati stabilnost, zaščito pred vremenskimi vplivi ter varno uporabo v različnih okoljih.

V Sloveniji je razvoj polnilne infrastrukture podprt z nacionalnimi strategijami in razvojnimi programi, ki jih izvajajo Ministrstvo za okolje, podnebje in energijo (MOPE), Borzen in distribucijski operater SODO (Borzen, 2024; MOPE, 2024; SODO, 2024). Ključna smernica je povečanje razpoložljivosti javnih polnilnic in zagotavljanje njihovega delovanja v skladu z evropskimi standardi interoperabilnosti in varnosti.

2.2 Standardi in predpisi za mehansko zasnovo polnilnih postaj

Zanesljivost, varnost in funkcionalnost mehanske zasnove polnilnih postaj so opredeljene v vrsti mednarodnih standardov. Ti standardi določajo tehnične parametre, varnostne zahteve, materiale, zaščito in ergonomijo naprav.

Najpomembnejši standard je IEC 61851-1:2017 (IEC, 2017b), ki določa splošne zahteve za električne polnilne sisteme za vozila – varnostne ukrepe, komunikacijske protokole in tehnične pogoje ter za delovanje EVSE (Electric Vehicle Supply Equipment) (IEC, 2017b).

Za polnilne postaje z enosmernim tokom (DC) se uporablja standard IEC 61851-23:2023, ki natančno opisuje delovanje sistemov z visoko močjo in pogoje za mehansko ter električno varnost (IEC, 2023).

Stopnje zaščite pred vdorom vode in prahu ureja IEC 60529, medtem ko je za zaščito pred mehanskimi udarci določen standard IEC 62262, ki določa t. i. IK-kode (IEC, 2017a). Poleg tega je v zvezi z dostopnostjo in ergonomijo pomemben standard ISO 14738, ki določa višine, dosege in postavitve upravljalnih elementov za optimalno uporabniško izkušnjo (ISO, 2002).

Ti standardi skupaj tvorijo koncept RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety), ki zagotavlja, da so naprave zanesljive, dostopne, enostavne za vzdrževanje in varne (ResearchGate, 2020). V kombinaciji z regulativo AFIR (EU 2023/1804) predstavljajo okvir, po katerem mora biti polnilna infrastruktura mehansko, električno in uporabniško skladna na ravni celotne Evropske unije (European Commission, 2023).

2.3 Materiali in odpornost na zunanje vplive

Izbor konstrukcijskih materialov vpliva na trajnost, stroške vzdrževanja in okoljski odtis polnilne postaje.

Najpogostejše uporabljeni materiali so:

- nerjavno jeklo – visoka mehanska trdnost, odpornost proti koroziji, primerno za javne površine,
- aluminij – lahek, odporen proti oksidaciji primeren za modularne in prenosne konstrukcije,
- kompoziti in polimeri – omogočajo oblikovno svobodo, zmanjšano težo in odpornost proti UV-sevanju (Zupančič, 2016).

Zaščita pred vremenskimi vplivi je definirana z oznakami IP (Ingress Protection) in IK (Impact Protection), ki določata odpornost proti vodi, prahu in udarcem. Za povečanje trajnosti se uporabljajo postopki površinske zaščite (prašno barvanje, eloksiranje) in dodatni ojačitveni elementi konstrukcije.

Trajnostno načrtovanje polnilnic vključuje uporabo LCC (Life Cycle Cost) in LCA (Life Cycle Assessment) metodologij, ki omogočata izračun celotnega stroška lastništva in okoljskega vpliva naprave skozi njen življenjski cikel (UNEP Life Cycle Initiative, 2020). Dobri primeri iz prakse, kot je ABB Terra 360 (ABB, n.d.), poudarjajo pomen vzdržljivosti in ekonomike: naprava dosega do 360 kW moči, uporablja aluminijasto ohišje in integrirano hlajenje, pri čemer proizvajalec izpostavlja »resilience, longevity and lowering the total cost of ownership« (ABB, n.d.).

2.4 Ergonomija v oblikovanju polnilnih postaj

Ergonomija je temeljni dejavnik uporabniške izkušnje in varnosti. Uporabnik mora imeti možnost enostavnega dostopa do priključka, kabla in upravljalnih elementov ne glede na telesno višino ali gibalne sposobnosti.

Po standardu ISO 14738 je priporočljiva višina priklopnih mest med 800 mm in 1200 mm, kar omogoča dostopnost tudi osebam z omejeno mobilnostjo (ISO, 2002).

Teža in gibljivost polnilnih kablov sta prav tako pomembna za zmanjšanje napora pri uporabi. Slaba ergonomija lahko povzroči nepravilno uporabo ali poškodbe uporabnikov.

V praksi se uveljavljajo rešitve, kot so ergonomska navijalna stojala za kable, zasloni z nastavljivim naklonom in priključki z mehanskim odklopom, ki preprečujejo poškodbe pri prekomerni obremenitvi (Siemens AG, 2023).

2.5 Konstrukcijska zanesljivost in vzdržljivost

Konstrukcijska zanesljivost pomeni, da polnilna postaja ohranja funkcionalnost v predvidenem življenjskem ciklu brez pogostih okvar. Meri se s kazalniki MTBF (Mean Time Between Failures) in MTTR (Mean Time To Repair), ki se uporabljata tudi v sistemih RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety) (ResearchGate, 2020).

Zasnova mora omogočati hitro in enostavno zamenjavo poškodovanih komponent, zato se sodobne polnilnice gradijo modularno.

Konstrukcija običajno vključuje:

- ojačane nosilne elemente proti vandalizmu,
- tesnila in drenažne kanale za zaščito pred vlago,
- enostavno snemljive panele za servisne posege,
- notranjo organizacijo kablov za lažje vzdrževanje.

Tovrstna konstrukcijska prilagoditev zmanjšuje stroške servisiranja in povečuje razpoložljivost (*uptime*) naprav (ABB, 2024b).

Kot poudarjata Pivec in Podgornik (2020), je trajnostni razvoj v tehničnih rešitvah mogoč le z integracijo okoljskih in ekonomskih načel v vse faze življenjskega cikla izdelka, kar vključuje zasnovo, proizvodnjo, uporabo in recikliranje. Tak pristop omogoča dolgoročno učinkovitost in skladnost s cilji Agende 2030 ter zmanjšuje celoten okoljski odtis naprav.

2.6 Trajnost in ekonomika življenjskega cikla

Trajnostni vidik mehanske zasnove vključuje materiale, proizvodne postopke in način vzdrževanja. Načela krožnega gospodarstva zahtevajo uporabo reciklabilnih materialov, zmanjšanje ogljičnega odtisa proizvodnje in optimizacijo logistike (European Commission, 2023).

Ekonomski vidik se meri z metodologijo TCO (Total Cost of Ownership), ki vključuje stroške nakupa, montaže, obratovanja, vzdrževanja in odlaganja naprave (ABB, n.d.). Po podatkih SODO (2024) in MOPE (2024) je v Sloveniji vse več poudarka na uporabi trajnostnih rešitev, kot so aluminijaste konstrukcije, lokalna proizvodnja in pametno upravljanje naprav.

Zmanjševanje stroškov lastništva in podaljševanje življenjske dobe mehanskih komponent sta ključni smernici prihodnjega razvoja.

2.7 Primeri dobrih praks v tujini

Tuje prakse ponujajo številne uspešne primere mehanske optimizacije:

- ABB Terra 360 – modularno aluminijasto ohišje, možnost zamenjave servisnih modulov (ABB, n.d.),
- Siemens SICHARGE D – ergonomski sistem kablov in zaščitna struktura iz jekla (Siemens AG, 2023),
- Ionity HPC – vodno hlajeni kabli in UV-odporni kompoziti (Ionity, n.d.),
- EVBox Troniq Modular – razširljiva konstrukcija z zamenljivimi napajalnimi enotami (EVBox, 2023),
- Tesla Supercharger V4 – minimalistična oblika in izboljšana ergonomija (ECOFACOR, 2025).

Ti primeri dokazujejo, da uspešna mehanska zasnova združuje varnost, modularnost, uporabnost in trajnost – lastnosti, ki neposredno vplivajo na zadovoljstvo uporabnikov in stroškovno učinkovitost.

Teoretične osnove diplomskega dela pa kažejo, da je mehanska zasnova polnilnih postaj bistvena za njihovo varnost, ergonomijo, trajnost in ekonomiko. Standardi IEC in ISO določajo tehnične zahteve, medtem ko evropska regulativa AFIR (EU 2023/1804) spodbuja razvoj interoperabilne in trajnostne infrastrukture. Materiali, ergonomija in modularnost vplivajo na celotni TCO in na sprejetost elektromobilnosti v družbi.

Celovit pristop, ki združuje tehnične, ekonomske in okoljske dejavnike, predstavlja osnovo za nadaljnji razvoj mehansko optimiziranih, zanesljivih in okolju prijaznih polnilnih postaj.

3 OBSTOJEČE STANJE

3.1 Pregled obstoječega stanja polnilne infrastrukture

V zadnjih letih se je v Sloveniji podobno kot v drugih evropskih državah močno povečalo število polnilnih postaj za električna vozila. Po podatkih SODO (2024) in Borzen (2024) je bilo konec leta 2024 v Sloveniji v uporabi več kot 2.000 javnih polnilnih mest, pri čemer se njihovo število vsako leto poveča za približno 20 %. Razvoj polnilne infrastrukture je del nacionalnih strateških dokumentov, kot sta *Strategija razvoja trajnostne mobilnosti* (MOPE, 2024) in *Akcijski načrt za alternativna goriva 2030*, ki sledi evropski uredbi AFIR (EU 2023/1804) (European Commission, 2023).

Polnilna infrastruktura se v praksi deli glede na način uporabe in moč:

- AC polnilnice (izmenični tok) – namenjene počasnemu polnjenju doma ali na parkiriščih, moči od 3,7 kW do 22 kW.
- DC polnilnice (enosmerni tok) – namenjene hitremu in ultra hitremu polnjenju na avtocestah, moči od 50 kW do 400 kW.

V Sloveniji delujejo številni ponudniki (npr. Petrol, Elektro Ljubljana, Etrek–Danfoss, Ionity), ki sledijo mednarodnim standardom IEC 61851 (IEC, 2017b), ISO 15118 (ISO, 2019) in EN 62196 (IEC, 2022).

Kljub tehnološkemu napredku pa so še vedno prisotne težave, kot so pomanjkljiva zaščita pred vandalizmom, nezadostno odvajanje vode, korozija nosilnih delov ter omejena modularnost konstrukcij.

Poleg tega se polnilne postaje pogosto umeščajo v zahtevna okolja (npr. parkirišča brez nadstreška, obcestni robovi, obalne lege), kjer so izpostavljene vlagi, soli in mehanskim poškodbam. To dodatno poudarja pomen kakovostne mehanske zasnove, ki mora zagotavljati zanesljivo delovanje in varnost uporabnikov (ABB, n.d.).

3.2 Mehanske značilnosti izbranih proizvajalcev

Analiza mehanske zasnove polnilnih postaj različnih proizvajalcev omogoča razumevanje trendov, prednosti in slabosti posameznih pristopov. V raziskavi so bili upoštevani štiri najpomembnejši proizvajalci: ABB, Siemens, EVBox in Tesla.

- ABB – serija Terra 360
Model ABB Terra 360 predstavlja eno najnaprednejših hitrih polnilnic na trgu s skupno močjo do 360 kW. Ohišje je izdelano iz aluminijeve zlitine z integriranimi moduli za hlajenje in zaščito IP55 ter IK10 (ABB, n.d., 2024b). Modularna konstrukcija omogoča hitro zamenjavo napajalnih modulov brez prekinitve delovanja, kar bistveno izboljšuje vzdržljivost in zmanjšuje stroške servisiranja.

Zasnova temelji na načelih RAMS, kar pomeni visoko stopnjo zanesljivosti (Reliability) in dostopnosti (Availability).

- Siemens – serija SICHARGE D
Siemens SICHARGE D se osredotoča na prilagodljivost in ergonomijo. Konstrukcija temelji na jeklenem ohišju z ojačanimi antivandal ploščami in notranjo zaščito pred vlago (IP54). Posebnost naprave je sistem samodejnega navijanja kablov, ki zmanjšuje obrabo in povečuje varnost uporabnika. Dodatna prednost je modularna zasnova, ki omogoča prilagoditev moči in števila priključkov glede na potrebe lokacije (Siemens AG, n.d.).
- EVBox – serija Troniq Modular
EVBox Troniq Modular je primer fleksibilne mehanske zasnove z aluminijasto nosilno strukturo in plastičnimi paneli, ki omogočajo lažje servisiranje. Ohišje ima zaščito IP54/IK10, a proizvajalec posebno pozornost namenja reciklabilnim materialom in nizkemu ogljičnemu odtisu (LCA analiza). Zaradi modularnosti se posamezni napajalni moduli lahko hitro zamenjajo, kar bistveno zniža MTTR (Mean Time To Repair) (EVBox, 2023).
- Tesla – Supercharger V4
Tesla v svojem modelu Supercharger V4 nadaljuje minimalistično oblikovno zasnovo z visoko stopnjo ergonomije. Polnilni stolpi so izdelani iz jeklene zlitine s prašnim premazom, kar zagotavlja visoko odpornost na korozijo in vremenske vplive. Kabli so tanjši in daljši kot pri prejšnjih generacijah, kar omogoča lažji doseg tudi pri vozilih z različnimi priključnimi mesti (ECOFACOR, 2025).
Tesla uporablja lastne standarde kakovosti, vendar je konstrukcija skladna z osnovnimi smernicami IEC 61851 (IEC, 2017) in ISO 20653 (ISO, 2013).

Skupna značilnost analiziranih modelov je visoka raven zaščite, modularnost in poudarek na trajnostni rabi materialov. Največ razlik se kaže v dostopnosti servisnih modulov, teži konstrukcije in načinu zaščite pred vandalizmom.

3.3 Primerjalna analiza konstrukcijskih rešitev

Primerjava mehanskih rešitev med izbranimi proizvajalci kaže jasne razlike v pristopih k trajnosti, ergonomiji in vzdržljivosti.

Tabela 1 prikazuje glavne konstrukcijske parametre, ki vplivajo na kakovost mehanske zasnove.

Proizvajalec	Material ohišja	Stopnja zaščite	Modularnost	Ergonomija	Trajnostni pristop
ABB Terra 360 (ABB, n.d., 2024b)	Aluminij	IP55 / IK10	Da	Dobra – lahka uporaba kablov	Da – reciklabilni materiali, nizek TCO
Siemens SICHARGE D (Siemens AG, 2023, n.d.)	Jeklo	IP54 / IK10	Da	Odlična – navijalni sistem kablov	Delno – poudarek na zanesljivosti
EVBox Troniq Modular (EVBox, 2023)	Aluminij + plastika	IP54 / IK10	Da	Srednja	Da – LCA analiza in reciklabilni materiali
Tesla Supercharger V4 (ECOFACOR, 2025; Tesla, 2024b)	Jeklo	IP44 / IK09	Delno	Odlična – lahki in dolgi kabli	Da – minimalističen dizajn, dolga življenjska doba

Tabela 1: konstrukcijski parametri
(Lastni vir)

V splošnem lahko ugotovimo, da ABB in EVBox dosegata najboljše razmerje med mehansko odpornostjo in trajnostno usmerjenostjo.

Siemens se izkaže pri ergonomiji in servisni modularnosti, medtem ko Tesla izstopa po preprostosti in estetiki, vendar ima nekoliko nižjo zaščito ohišja.

Analiza potrjuje, da so glavni trendi v mehanski zasnovi polnilnic usmerjeni v:

- zmanjšanje mase konstrukcije (uporaba aluminija in kompozitov),
- povečanje zaščite (IP55 in več),
- poenostavljeno servisiranje,
- ter trajnostno proizvodnjo z reciklabilnimi materiali.

Poudariti velja, da kakovost mehanske zasnove neposredno vpliva na RAMS kazalnike: višja zanesljivost in lažje vzdrževanje pomenita manj izpadov delovanja in nižje skupne stroške lastništva (TCO) (ResearchGate, 2020).

3.4 Pomen ergonomije, varnosti in vzdrževanja

Ergonomija, varnost in vzdrževanje predstavljajo ključne dejavnike kakovosti mehanske zasnove.

Pri polnilnih postajah gre za naprave, s katerimi uporabniki fizično upravljajo vsak dan — zato morajo biti vsi elementi postavljeni tako, da omogočajo varno, preprosto in spontano uporabo.

Nepravilno zasnovana višina priklopnega mesta ali teža kabla lahko povzročita poškodbe, zmanjšata zadovoljstvo uporabnikov in povečata potrebo po servisnih posegih (ISO, 2002).

Standard ISO 14738 določa osnovne antropometrične zahteve, kot so doseg roke, višina stojnega položaja in vidni koti zaslona (ISO, 2002). Vsi analizirani proizvajalci (ABB, Siemens, EVBox, Tesla) te smernice upoštevajo, vendar jih uresničujejo različno.

Na primer, Siemens SICHARGE D uporablja navijalni sistem, ki zmanjšuje potrebo po fizični moči, medtem ko Tesla Supercharger V4 uporablja daljše, lažje kable, kar poveča dostopnost za različne tipe vozil (Siemens, n.d.; ECOFACTOR, 2025).

Varnost mehanske konstrukcije je opredeljena s standardi IEC 61851-1, IEC 60529 in IEC 62262 (IEC, 2013, 2017a, 2017b), ki določajo stopnjo zaščite pred vlago, prahom in mehanskimi udarci.

Najvišja zaščita, dosežena pri komercialnih modelih (npr. ABB Terra 360 z IP55/IK10), zagotavlja visoko odpornost na zunanje vplive in vandalizem (ABB, n.d.). Vzdrževanje je tesno povezano s konceptom RAMS, zlasti z vidikoma *Maintainability* in *Availability*. Modularna konstrukcija omogoča hitre menjave delov brez popolne zaustavitve delovanja, kar znižuje MTTR (Mean Time To Repair) in povečuje učinkovitost sistema (ResearchGate, 2020).

Z vidika uporabniške varnosti so vse bolj pogosti tudi rešitve, ki preprečujejo električni stik pri odklopu kabla, in senzorji za zaznavanje nenamernih poškodb (EVBox, 2023). Zanesljiva, varna in ergonomsko zasnovana mehanska konstrukcija torej bistveno pripomore k daljši življenjski dobi polnilne postaje in zmanjšanju skupnih stroškov lastništva (*TCO – Total Cost of Ownership*) (UNEP, 2023).

3.5 Povzetek ugotovitev

Analiza obstoječih mehanskih rešitev pri štirih vodilnih proizvajalcih je pokazala, da so sodobne polnilne postaje zasnovane z visoko stopnjo modularnosti, zaščite in trajnostne usmerjenosti.

Kljub temu obstajajo razlike, ki vplivajo na uporabniško izkušnjo in stroške vzdrževanja.

Glavne ugotovitve so:

- mehanska zasnova neposredno vpliva na zanesljivost, varnost in življenjsko dobo polnilne postaje;

- aluminijaste in jeklene konstrukcije z zaščito IP54–IP55 ter IK09–IK10 predstavljajo standard sodobne odpornosti;
- modularnost in dostopnost servisnih delov zmanjšujeta MTTR in povečujeta Availability;
- ergonomija in uporabniška prijaznost sta ključni pri javnih postajah, kjer mora biti uporaba enostavna za vse skupine uporabnikov;
- proizvajalci se vse bolj osredotočajo na trajnostni pristop, uporabo reciklabilnih materialov in zmanjšanje TCO v celotnem življenjskem ciklu.

Analiza potrjuje, da se mehanska zanesljivost in kakovost konstrukcije izkazujeta kot temeljna pogoja za razvoj varne, trajnostne in dolgoročno učinkovite polnilne infrastrukture.

Te ugotovitve služijo kot izhodišče za naslednje poglavje, kjer bodo predstavljeni konkretni predlogi izboljšav mehanske zasnove na podlagi teh analiz.

4 PRAKTIČNI DEL

4.1 Uvod v praktični del

V praktičnem delu diplomskega dela je predstavljena analiza mehanske zasnove in izvedbe izbranih polnilnih postaj za električna vozila na območju Ljubljane in okolice. Namen raziskave je bil ugotoviti, v kolikšni meri so obstoječe polnilnice skladne z zahtevami sodobnih standardov, načeli trajnostnega razvoja in uporabniškimi potrebami.

Analiza temelji na teoretičnih izhodiščih, predstavljenih v prejšnjih poglavjih, kjer so obravnavani ključni vidiki, kot so standardizacija (IEC 61851, ISO 20653), zanesljivost (RAMS – Reliability, Availability, Maintainability and Safety) ter ergonomija in trajnostni pristopi, ki izhajajo iz smernic uredbe AFIR (EU 2023/1804) (European Commission, 2023; ResearchGate, 2020).

Empirični del je bil izveden z metodo neposrednega opazovanja in tehnične dokumentacije, dopolnjen s fotografskim gradivom, grafi in razpredelnicami. Pri analizi so bili upoštevani naslednji dejavniki:

- mehanska zasnova in uporabljeni materiali ohišij,
- stopnja zaščite (IP, IK),
- postavitev in ergonomija polnilnih mest,
- dostopnost in varnost za uporabnike,
- ter trajnostni in vzdrževalni vidiki.

Terensko delo je potekalo na več lokacijah, kjer so bile dokumentirane različne vrste polnilnih postaj (javne, komercialne in zasebne).

Na tej osnovi so bili izdelani pregledni grafi, tabele in opisi posameznih modelov, ki prikazujejo dejansko stanje mehanskih rešitev v praksi.

Takšen pristop omogoča primerjavo med teorijo in realno izvedbo, s čimer se preverja skladnost smernic s stanjem na terenu in izpostavljajo možnosti za nadaljnje izboljšave.

4.2 Terenska analiza polnilnic

Za analizo mehanske zasnove so bile izbrane tri blagovne znamke polnilnih postaj, ki so prisotne na slovenskem trgu: ABB, Siemens in Etrac. Podatki temeljijo na javno dostopnih tehničnih specifikacijah proizvajalcev in na lastnih terenskih opažanjih.

4.2.1 ABB

Podjetje ABB je med vodilnimi proizvajalci hitrih polnilnic za električna vozila. Njihove postaje so večinoma zasnovane kot robustne samostojne enote z jeklenimi ohišji in dodatnimi premazi proti koroziji. Konstrukcija je primerna za zunanje okolje in

omogoča delovanje v različnih vremenskih pogojih (od $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$) (ABB, 2024a).

Prednosti:

- robustna konstrukcija,
- visoka stopnja zaščite (IP54–IP66),
- možnost modularne nadgradnje.

Slabosti:

- višja teža in težji kabli,
- zahtevnejše vzdrževanje premaza.

4.2.2 Siemens

Siemensove polnilne postaje se uporabljajo tako v mestnih okoljih kot na avtocestnih počivališčih. Ohišja so pogosto izdelana iz aluminija v kombinaciji s kompoziti, kar zmanjšuje težo in izboljšuje odpornost proti koroziji. Poseben poudarek dajejo modularnosti, ki omogoča lažjo nadgradnjo programske in strojne opreme (Siemens AG, 2023, n.d).

Prednosti:

- lahka, a trpežna konstrukcija,
- dobra ergonomija kablov (vgrajeni nosilci in navijalniki),
- estetsko oblikovanje za urbano okolje.

Slabosti:

- višja cena,
- aluminij se lahko deformira ob večjih mehanskih obremenitvah.

4.2.3 Etrel

Slovenski proizvajalec Etrel razvija polnilne postaje, ki združujejo funkcionalnost in estetsko dovršen dizajn. Njihova ohišja so pogosto izdelana iz kombinacije aluminija in plastike, kar omogoča prilagodljivost oblik in barvnih rešitev. Etrelove postaje so priljubljene v podjetjih in gospodinjstvih, pa tudi v javnih parkirnih prostorih (Etrel, 2024).

Prednosti:

- estetska in kompaktna zasnova,
- prilagodljivost za različna okolja,
- lažji kabli in ergonomsko postavljena priklopna mesta.

Slabosti:

- manjša odpornost plastičnih elementov proti vandalizmu,
- nižji zaščitni razredi (IP44–IP54) v primerjavi z robustnejšimi rešitvami.

4.2.4 Tesla Supercharger

Polnilnica Tesla Supercharger spada med ultrahitro DC polnilno infrastrukturo, namenjeno predvsem Teslinim vozilom, a novejša različica omogočajo tudi univerzalno uporabo (CCS standard).

Postavljena je v Ljubljani in je del evropske mreže, ki omogoča zelo hitro polnjenje – do 250 kW. Ohišje je visoko 2000 mm, široko 700 mm in globoko 250 mm. Polnilnica je značilno oblikovana v belo-črnem dizajnu z rdečim logotipom TESLA, kar ji daje visoko prepoznavnost in estetsko vrednost (Tesla, 2024a, 2024b).

Prednosti:

- izjemna učinkovitost,
- avtomatska optimizacija moči glede na stanje baterije ter vmesnik, ki omogoča enostavno uporabo.
- napredni sistem hlajenja omogoča hitro polnjenje brez pregrevanja.

Slabosti:

- omejena združljivost s starejšimi vozili, ki nimajo CCS vtiča,
- zahteva po registraciji v Teslini aplikaciji.

4.2.5 Ionity

Polnilnica Ionity HPC (High Power Charger) je ena najzmogljivejših polnilnih postaj v Evropi. Deluje po DC načelu ultrahitrega polnjenja in omogoča moč do 350 kW.

Njene dimenzije so približno 2100 mm višine, 600 mm širine in 300 mm globine.

Ionity polnilnice uporabljajo napredno tehnologijo vodnega hlajenja kablov, ki omogoča stabilno delovanje pri visokih tokovih (Ionity, 2020, n.d.).

Prednosti:

- zelo kratki čas polnjenja (do 15 minut za 80 % kapacitete baterije) ter široka dostopnost na evropskih avtocestah,
- polnilnice so standardizirane, združljive z večino električnih vozil (CCS standard) in povezane v centralno mrežo za upravljanje porabe energije.

Slabosti:

- visoki stroški postavitve,
- zahtevna električna infrastruktura, potrebna za priklop.

4.3 Primer domače prakse – Petrol

Podjetje Petrol d. d. je največji ponudnik javnih električnih polnilnic v Sloveniji in ima ključno vlogo pri razvoju infrastrukture za elektromobilnost. V svoji mreži upravlja več kot sto polnilnih mest na različnih lokacijah po državi, v prihodnje pa načrtuje širitev na več kot 1500 polnilnic do leta 2025 (Petrol, 2025).

Vrste polnilnic:

Petrol uporablja različne tipe polnilnic, ki jih namešča na bencinskih servisih, v mestnih središčih in ob prometnicah:

- standardne AC polnilnice (moč do 22 kW), namenjene daljšemu parkiranju,
- hitre DC polnilnice (moč do 50 kW), primerne za polnjenje v času nakupov ali krajših postankov,
- ultrahitre polnilne postaje (moč 150–200 kW), ki omogočajo polnjenje do 80 % kapacitete baterije v manj kot 30 minutah.

Primer ultrahitrih postaj so nove lokacije v Kozini, Kopru in Lukovici, kjer je Petrol postavil polnilnice z močjo do 200 kW in možnostjo sočasnega polnjenja dveh vozil (Petrol, 2024).

Mehanska zasnova in značilnosti

Polnilnice v mreži Petrol temeljijo na rešitvah različnih proizvajalcev (ABB, Siemens Industry Inc., Etrel), kar omogoča kombinacijo robustnih konstrukcij in ergonomskih rešitev. Večina enot je zasnovana kot samostojne jeklene konstrukcije z visoko stopnjo zaščite (IP54–IP66), primerne za delovanje v zahtevnih zunanjih pogojih. Ultrahitre polnilnice se pogosto dopolnjuje z več priklopnimi mesti in posebnimi sistemi za upravljanje kablov (ABB, 2022; Etrel, 2025; Siemens AG n.d.) .

Prednosti

- široka dostopnost po Sloveniji,
- uporaba različnih tipov polnilnic za različne potrebe,
- vpeljava ultrahitrih tehnologij,
- sodelovanje z domačimi proizvajalci (npr. Etrel).

Pomanjkljivosti

- večina polnilnic je nameščena na bencinskih servisih, kar omejuje dostop v urbanih središčih,
- težji kabli pri hitrih in ultrahitrih postajah še vedno predstavljajo izziv za uporabnike,
- potreba po dodatnih zaščitnih ukrepih proti vandalizmu na bolj obremenjenih lokacijah.

Petrol s svojo mrežo predstavlja ključnega domačega akterja pri razvoju polnilne infrastrukture v Sloveniji. Njegova strategija združuje globalne tehnologije in lokalne potrebe, hkrati pa izpostavlja izzive na področju ergonomije in trajnosti mehanske zasnove. Primer Petrolovih rešitev bo zato služil kot dragocena referenca pri oblikovanju predlogov izboljšav.

5 ANALIZA IN PRIMERJAVA REZULTATOV

5.1 Primerjava konstrukcijskih rešitev

Za primerjavo mehanske zasnove polnilnic je bilo analiziranih šest različnih polnilnih postaj, dokumentiranih na terenu v Ljubljani, ter dva literaturna primera proizvajalca Siemens in Ionity. V analizo so vključene lastne meritve dimenzij, terenska opažanja ter tehnični podatki s ploščic proizvajalcev.

Tabela 2 prikazuje primerjavo konstrukcijskih rešitev polnilnic.

Proizvajalec / Model	Tip polnilnice	Dimenzije (V × Š × G)	Zaščitni razred (IP)	Moč	Prednosti	Slabosti
ABB (Terra 53 CJG, Ljubljana – Lidl)	DC	1900 mm × 900 mm × 500 mm	IP54	do 50 kW	robustna jeklena konstrukcija, primerna za zunanje okolje, visoka odpornost	težja konstrukcija, težji kabli, zahtevnejše vzdrževanje premaza
Etrel (Etrel, 2024, 2025) (Ljubljana)	AC	1300 mm × 280 mm × 200 mm	IP44–IP54	do 22 kW	kompaktna, estetska zasnova, ergonomično postavljene vtičnice	nižja odpornost plastičnih delov proti vandalizmu
Wallbox (Wallbox, 2024) (Supernova Fast Charger, Ljubljana)	DC	1700 mm × 350 mm × 150 mm	IP54	do 60 kW	moderna zasnova, kompaktna, dobro označeni priklopi, LED osvetlitev	večja teža (260 kg), primerna predvsem za javna parkirišča
Sodobna DC polnilnica (Ljubljana)	DC	2000 mm × 700 mm × 400 mm	–	>50 kW	moderna zasnova, dobra vidnost (LED osvetlitev), ergonomska višina kablov	masivna, zavzame več prostora, kabli izpostavljeni vandalizmu
Efacec QC45 (Efacec, 2014) (Ljubljana)	DC	2000 mm × 600 mm × 600 mm	IP54	50–500 V DC	več priklonih mest, robustna zasnova, enostavna uporaba	večja masa in dimenzije, potreben večji prostor
Siemens (Siemens AG, 2023, n.d.) (literaturni primer)	AC/DC	1800 mm × 800 mm × 450 mm	IP54–IP65	22–150 kW	modularna zasnova, kombinacija aluminija in kompozitov, lažja konstrukcija	višja cena, možnost deformacij aluminija pri udarcih
Tesla Supercharger (Tesla, 2024b) (Ljubljana)	DC / ultrahitro	2000 mm × 700 mm × 250 mm	–	do 250 kW	visoka učinkovitost, integracija z omrežjem Tesla, optimizacija za Tesline baterije	omejena kompatibilnost z nekaterimi vozili, strožji pogoji dostopa
Ionity (Ionity 2020, n.d.) (literaturni primer)	DC / ultrahitro	2100 mm × 600 mm × 300 mm	IP54+	do 350 kW	zelo visoka zmogljivost, široka evropska mreža, skladnost s standardi	visoki stroški postavitve, zahteva močno infrastrukturo, prostorske potrebe

Tabela 2: Primerjava konstrukcijskih rešitev polnilnic
(Lastni vir)

Iz preglednice je razvidno, da se proizvajalci in ponudniki polnilnic razlikujejo predvsem v materialih, zasnovi in ciljnem okolju uporabe:

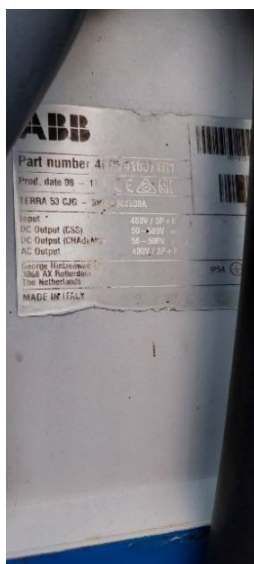
- ABB uporablja robustna jeklena ohišja, primerna za javne površine z visoko obremenitvijo (ABB, 2024b). Slabost ostajajo težki kabli in večja masa.

Slika 1 prikazuje primer polnilne postaje ABB Terra 53 CJG.



*Slika 1: Polnilna postaja ABB Terra 53 CJG (Ljubljana – Lidl)
(Lastni vir)*

Slika 2 prikazuje identifikacijsko ploščo ABB polnilne postaje.



*Slika 2: Identifikacijska ploščica ABB polnilne postaje (model Terra 53 CJG) v
Ljubljani)
(Lastni vir)*

- Etrel ponuja kompaktne in estetske rešitve, ki so primerne za mestna okolja, a imajo nižjo odpornost proti vandalizmu (Etrel, 2024).

Slika 3 prikazuje Etrelovo AC polnilno postajo (Petrol).



Slika 3: Etrelova AC polnilna postaja pri Petrolu v Ljubljani
(Lastni vir)

- Wallbox se s svojo polnilnico Supernova osredotoča na kombinacijo kompaktne, sodobne zasnove in srednje moči (60 kW), primerne za urbana središča (Wallbox, 2024, n.d.).

Slika 4 predstavlja Wallbox polnilno postajo Supernova Fast Charger.



Slika 4: Wallbox polnilna postaja Supernova Fast Charger v Ljubljani
(Lastni vir)

Slika 5 predstavlja Wallbox identifikacijsko ploščo.



Slika 5: Wallbox identifikacijska ploščica v Ljubljani
(Lastni vir)

- Neoznačena DC polnilnica iz Ljubljane prikazuje trend modernih, vizualno dovršenih rešitev z LED osvetlitvijo, a zavzame več prostora.

Slika 6 predstavlja sodobno DC polnilno postajo z LED osvetlitvijo.



Slika 6: Sodobna DC polnilna postaja z LED osvetlitvijo (Ljubljana)
(Lastni vir)

- Efacec QC45 je robustna postaja večjih dimenzij, namenjena zanesljivemu hitremu polnjenju, vendar zahteva več prostora za namestitev (Efacec, 2014).

Slika 7 predstavlja polnilno postajo Efacec QC45.



Slika 7: Polnilna postaja Efacec QC45 (Ljubljana)
(Lastni vir)

- Siemens ostaja pomemben literaturni primer modularne zasnove, ki združuje lažje materiale in napredne tehnične rešitve (Siemens AG, n.d.).

Slika 8 predstavlja polnilno postajo Siemens VersiCharge DC/Ultra polnilnica.



Slika8: Siemens VersiCharge DC/Ultra polnilnica
(Vir: Siemens AG spletni katalog, 2023)

- Tesla Supercharger izstopa z estetsko dovršeno, prepoznavno obliko in visoko učinkovitostjo (Tesla, 2024a).

Slika 9 predstavlja polnilno postajo Tesla Supercharger.



Slika 9: Tesla Supercharger – celoten pogled polnilne postaje (Ljubljana)
(Lastni vir)

Slika 10 predstavlja pogled na priklonni vmesnik polnilne postaje Tesla Supercharger.



Slika 10: Tesla Supercharger – pogled na priklonni vmesnik (Ljubljana)
(Lastni vir)

- Ionity HPC je zasnovan kot modularna, tehnološko napredna polnilnica z močjo do 350 kW. Omogoča izjemno kratke čase polnjenja in uporabo pri vseh sodobnih vozilih s CCS priključkom (Ionity. 2020).

Slika 11 predstavlja polnilno postajo Ionity HPC.



Slika11: Ionity HPC polnilna postaja (literaturni primer)
(Vir: Ionity, 2025)

5.2 Primerjalna tabela uporabljenih materialov in konstrukcijskih lastnosti

Za primerjavo obstoječih rešitev so analizirani materiali, uporabljeni pri konstrukciji polnilnic, njihove zaščitne lastnosti ter ergonomija uporabe je prikazana v tabeli 2.

Tabela 3 prikazuje analizo prednosti in slabosti.

Proizvajalec	Material ohišja	Prednosti	Slabosti	Zaščitni razred (IP)	Ergonomija kablov
ABB (ABB, 2024b)	jeklo (pocinkano, s prašnim premazom)	visoka mehanska odpornost, robustnost, dolgoletne izkušnje	težja konstrukcija, potreba po rednem vzdrževanju premaza	IP54 – IP66	težji kabli, izboljšan nosilec
Siemens (Siemens AG, 2023, n.d.)	aluminij + kompoziti	dobra odpornost proti koroziji, lažja konstrukcija, modularnost	višja cena, možnost deformacij pri udarcih	IP54 – IP65	rešitve za upravljanje kablov, boljša ergonomija
Etrel (Etrel, 2024, 2025)	aluminij + plastika	estetska zasnova, prilagodljivost, primerna za urbana okolja	manjša odpornost plastike proti vandalizmu	IP44 – IP54	lažji kabli, dostopna višina priklopov

Tabela 3: Analiza prednosti in slabosti polnilnic (ABB, Siemens, Etrel)
(Lastni vir)

Tabela prikazuje, da se proizvajalci odločajo za različne materiale glede na ciljno okolje uporabe. Jeklo je primerno za zahtevnejša okolja, aluminij za lažje in odpornejše konstrukcije, plastika pa za estetsko prilagodljivost, a z omejitvami pri odpornosti.

5.3 Odpornost na mehanske obremenitve in vremenske vplive

Večina analiziranih polnilnic je zasnovana za delovanje na prostem, kjer so izpostavljene dežju, snegu, UV sevanju in mehanskim poškodbam. Proizvajalci

rešujejo ta problem s pomočjo posebnih premazov (prašno barvanje, anodizacija aluminija), tesnjenjem spojev in uporabo kakovostnih plastičnih materialov.

Pri mehanski odpornosti izstopajo ABB-jeve rešitve, ki so zelo robustne, medtem ko Siemens in Etrel več poudarka namenjata estetiki in ergonomiji. Kljub temu je zaščita pred vandalizmom še vedno eden največjih izzivov, saj je zaradi dostopnosti v javnem prostoru možnost poškodb visoka.

5.4 Ergonomija in uporabniška izkušnja

Ergonomija je področje, kjer obstajajo največje razlike med proizvajalci.

- ABB: robustne polnilnice zanesljivo delujejo, vendar so kabli težji in za marsikaterega uporabnika manj priročni (ABB, 2024a).
- Siemens: vgrajuje napredne rešitve za upravljanje kablov (navijalniki, nosilci), kar izboljšuje uporabniško izkušnjo (Siemens AG, n.d.).
- Etrel: daje poudarek na dostopni višini priklopov, estetski zasnovi in lažjih kablji, kar izboljšuje ergonomijo v urbanem okolju (Etrel, 2024).
- Razlike v ergonomiji kažejo, da robustnost pogosto pride na račun uporabniške prijaznosti. V prihodnje bo treba poiskati ravnovesje med obema vidikoma.

Med terenskim opazovanjem je bil zabeležen primer, ko polnjenje vozila Renault Zoe na javni polnilnici ni bilo mogoče. Slika 12 prikazuje napako pri polnjenju električnega vozila Renault Zoe.



*Slika 12: Prikaz napake pri polnjenju električnega vozila Renault Zoe
(Lastni vir)*

Na armaturni plošči se je pojavilo opozorilo »Battery charging impossible«, kar kaže na napako v komunikaciji med vozilom in polnilno postajo. Vzrok težave je bil v okvari polnilnega modula vozila, kljub temu pa primer opozarja na pomen zanesljivega mehanskega in električnega stika med vozilom in polnilno postajo.

Čeprav je bila napaka programske-elektronske narave, so mehanski elementi (oblika, stabilnost in natančnost priključnega vmesnika) ključni pri zagotavljanju varnega in učinkovitega prenosa električne energije. Neustrezno poravnani ali mehansko obremenjeni priključki lahko povzročijo nepravilne kontakte, kar posredno vpliva na komunikacijske napake med napravama. Takšni primeri potrjujejo, da je pri načrtovanju polnilne infrastrukture potrebna celostna obravnava, ki združuje mehansko odpornost, ergonomijo in zanesljivo elektronsko povezljivost.

6 PREDLOGI IZBOLJŠAV MEHANSKE ZASNOVE

Na podlagi empirične analize mehanskih značilnosti polnilnih postaj, predstavljene v prejšnjih poglavjih, so bile oblikovane usmeritve in predlogi za izboljšave konstrukcijskih, ergonomskih in trajnostnih rešitev. Namen teh predlogov je povečati učinkovitost, zanesljivost in uporabniško prijaznost polnilne infrastrukture ter zmanjšati stroške vzdrževanja skozi življenjski cikel naprave.

Izboljšave temeljijo na načelih RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety), ki zagotavljajo celovit pristop k tehnični zanesljivosti in uporabni varnosti (ResearchGate, 2020).

Dodatno so upoštevane smernice uredbe AFIR (EU 2023/1804), ki poudarja standardizacijo, interoperabilnost, trajnost in dostopnost infrastrukture (European Commission, 2023).

Pri načrtovanju novih rešitev je treba slediti tudi konceptom LCC (Life Cycle Cost) in TCO (Total Cost of Ownership), ki omogočata celostno oceno ekonomskih učinkov mehanske zasnove, ter trajnostnim načelom, ki izhajajo iz Evropskega zelenega dogovora (European Green Deal) (European Commission, 2024).

6.1 Empirični predlogi in rezultati

V nadaljevanju so prikazani rezultati analize mehanskih in konstrukcijskih izboljšav, ki temeljijo na opazovanju obstoječih rešitev ter primerjavi s smernicami iz prejšnjih poglavij. Prikazane tabele, grafi in slike ponazarjajo ključne predloge glede izbire materialov, ergonomije, zaščite in modularnosti konstrukcije.

6.2 Konstrukcijske izboljšave za večjo trajnost

Za povečanje življenjske dobe polnilnih postaj je smiselna uporaba materialov, ki združujejo visoko mehansko odpornost in odpornost na zunanje vplive. Ena od možnosti je kombinacija jeklenega ogrodja za nosilne dele in aluminijastih plošč za zunanje ohišje. Tako bi zagotovili robustnost in hkrati zmanjšali težo konstrukcije.

Priporočljivo je tudi uvajanje modularnih konstrukcij, kjer bi bile posamezne komponente (ohišje, vrata, nosilci kablov) zasnovane tako, da jih je mogoče hitro zamenjati brez posega v celotno napravo. To bi skrajšalo čas servisiranja in znižalo stroške vzdrževanja.

6.3 Rešitve za izboljšanje ergonomije in varnosti uporabnikov

Ena glavnih težav pri obstoječih polnilnicah so težki kabli. Predlagamo uvedbo lažjih, tanjših kablov z izboljšano izolacijo, ki bi bili enako zanesljivi, a enostavnejši za rokovanje. Poleg tega bi bilo smiselno vgraditi sisteme za navijanje ali obešanje kablov, podobno kot pri industrijskih električnih orodjih.

Višina priklopnih mest mora biti prilagojena širši skupini uporabnikov. Standardizacija višine med 80 in 120 cm bi omogočila enostaven dostop večini uporabnikov, vključno z osebami na invalidskih vozičkih. Dodatno varnost bi zagotovili z mehanskimi zaporami in zaklepnimi sistemi, ki preprečujejo nenamerno izklapljanje kabla med polnjenjem.

6.4 Predlogi zaščite pred vandalizmom in vremenskimi vplivi

Zaščita pred vandalizmom ostaja pomemben izziv. Ena od možnosti je uporaba ojačanih kovinskih plošč, varnostnih vijakov in zaklepnih mehanizmov, ki otežujejo nedovoljene posege. Prav tako je smiselno razmisliti o uporabi transparentnih zaščitnih premazov, ki zmanjšujejo vidnost prask in poškodb.

Za zaščito pred vremenskimi vplivi je priporočljiva uporaba IP65 zaščite ali višje, kar zagotavlja odpornost na prah in močan dež. Poleg tega je smiselno vgraditi prezračevalne sisteme, ki preprečujejo kondenzacijo vlage v notranjosti ohišja.

6.5 Priporočila za implementacijo in nadaljnje delo

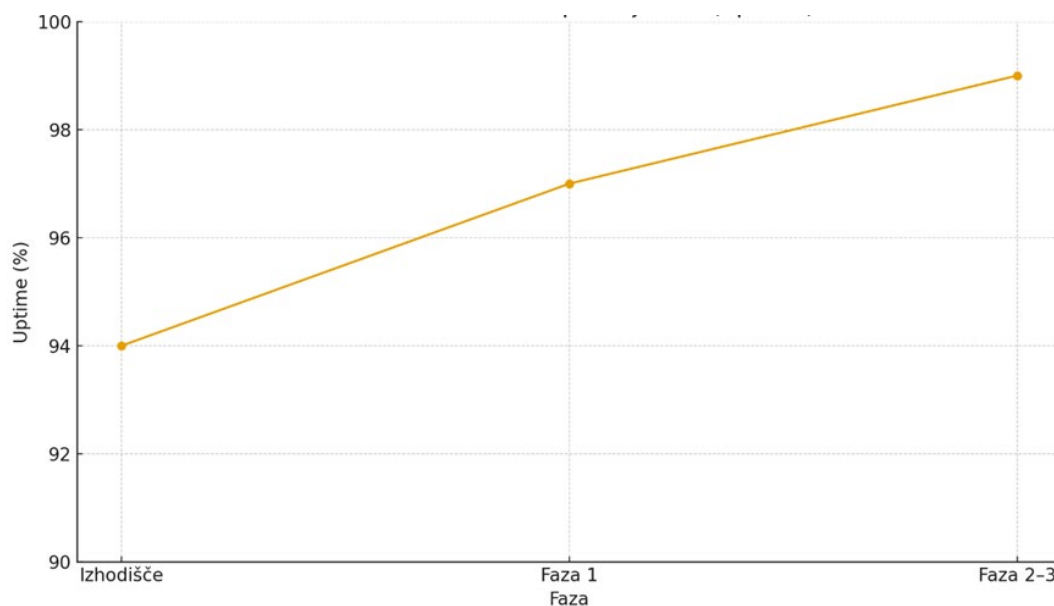
To poglavje predstavlja fazni načrt za dvig razpoložljivosti polnilnih postaj, zmanjšanje operativnih tveganj in optimizacijo stroškov vzdrževanja. Priporočila so zasnovana za postopno uvedbo – najprej na pilotnih lokacijah, nato standardizirano na celotnem sistemu.

Merjenje temelji na jasnih kazalnikih na ravni posameznega priključka: Uptime (delež časa funkcionalne razpoložljivosti), MTTR (povprečni čas od okvare do ponovne razpoložljivosti), MTBF (povprečni čas med okvarami), delež neuspehov zaradi kablov ter TCO (celotni stroški v 12 mesecih). Podatki se zajemajo neprekinjeno z časovnimi žigi, identifikatorji lokacij, tipi dogodkov, klasifikacijo vzrokov in stroški intervencij. Mesečna konsolidacija omogoča sledljivost in primerjave med lokacijami.

6.5.1 KPI-ji in ciljne vrednosti

Na sliki 13 je prikazan trend rasti razpoložljivosti (Uptime) skozi posamezne faze optimizacije. Z grafa je razvidno, da se razpoložljivost po uvedbi ukrepov v prvi fazi poveča z začetnih 94 % na približno 97 %, v drugi fazi pa doseže skoraj 99 %. To

potrjuje učinkovitost postopne implementacije in kaže na pozitivne učinke standardizacije vzdrževanja ter proaktivnega spremljanja kazalnikov.



Slika 13: Uptime po fazah
(Lastni vir)

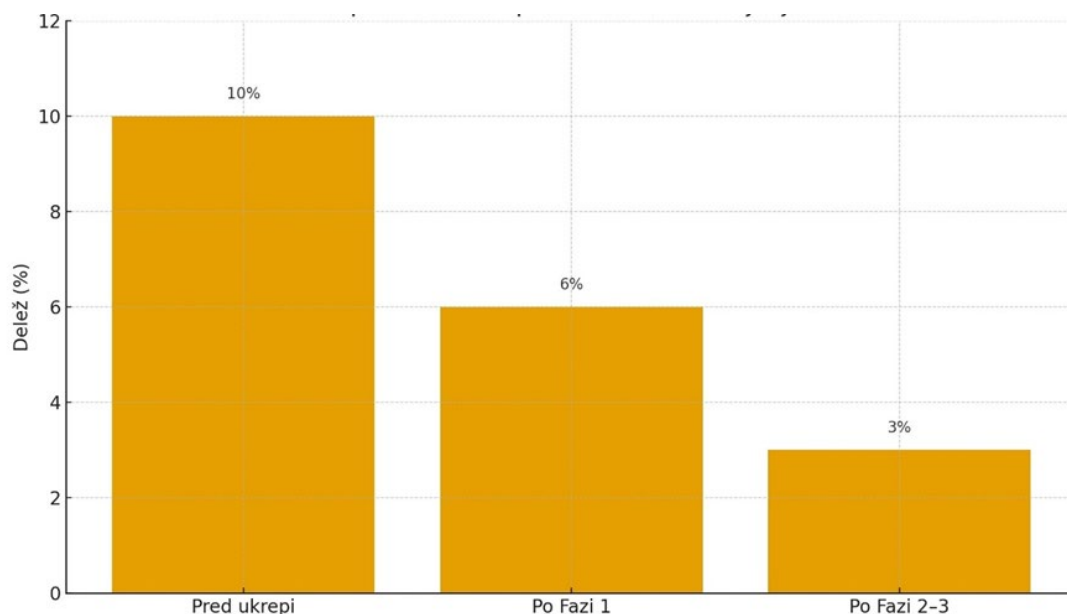
Spodnje vrednosti so ilustrativni primer; ob uvozu dejanskih podatkov bodo zamenjane z realnimi izhodišči.

Tabela 4 prikazuje izhodišča in cilje KPI-a.

KPI	Izhodišče	Faza 1 (0–6 m)	Faza 2–3 (6–18+ m)
Uptime (delež delujočih priključkov)	94 %	97 %	99 %
Neuspehi zaradi kablov	10 %	6 %	3 %
Intervencije vzdrževanja (št./lokacijo/mesec)	3,0	2,0	1,0
MTTR – povprečni čas izpada (h)	12	8	4
MTBF – povprečen čas med okvarami (dni)	45	60	90
NPS uporabnikov	+10	+25	+40

Tabela 4: KPI - Izhodišča in cilji
(Lastni vir)

Na sliki 14 je prikazan delež neuspehov pri delovanju polnilnih postaj v posameznih fazah optimizacije. Razvidno je, da se je delež napak po uvedbi ukrepov v prvi fazi zmanjšal z 10 % na 6 %, po zaključku druge faze pa na le še 3 %. To potrjuje učinkovitost sistematičnega pristopa k vzdrževanju in nadzoru, predvsem v segmentu upravljanja kablov ter spremljanja operativnih dogodkov. Zmanjšanje deleža neuspehov neposredno vpliva na večjo zanesljivost delovanja in nižje stroške intervencij.



Slika 14: Delež neuspehov zaradi poškodovanih/manjkajočih kablov
(Lastni vir)

6.5.2 Skladnost s standardi in načela zasnove

Mehanska zaščita zahteva stopnjo IP65 za ohišja in IK08–IK10 za izpostavljene panele. Načela zasnove vključujejo modularnost (menjava v manj kot 15 minutah), sistematično upravljanje kablov z navijalniki, korozijsko in UV odpornost ter standardizacijo višin in razporeditve. To zagotavlja krajše posege, nižjo variabilnost med lokacijami in večjo ponovljivost rezultatov.

6.5.3 Faze implementacije

Faza 1 (0–6 mesecev) uvaja upravljanje kablov, standardizira višine in ojača ohišja glede IP/IK. Dodamo osnovne ukrepe proti vandalizmu in vzpostavimo telemetrijo za klasifikacijo vzrokov. Sprejem potrdimo pri: uptime ≥ 97 %, kabelski neuspehi ≤ 6 %, MTTR ≤ 8 h.

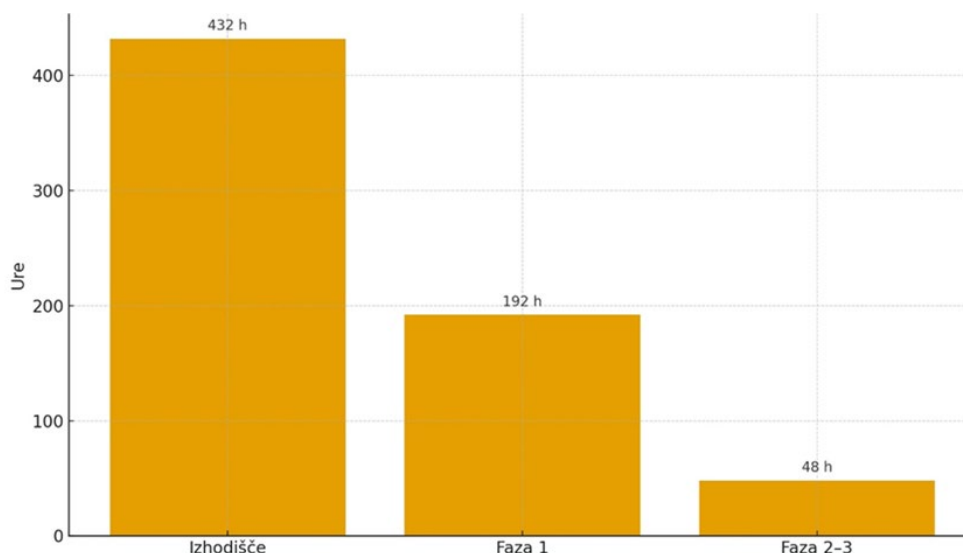
Faza 2 (6–18 mesecev) uvaja modularizacijo konstrukcije, standardizirane menjave vrat in panelov ter nadgradnje komunikacije in plačil. Izvedemo laboratorijske preizkuse (IP, IK, korozija, UV) in uporabniške teste. Cilji: uptime ~99 %, kabelski neuspehi ≤ 3 %, ≤ 1 intervencija/mesec/lokacijo.

Faza 3 (18+ mesecev) standardizira prakse z internim standardom, katalogom modulov, pogodbenim vzdrževanjem in SLA. Sprejeta je, ko KPI-ji štiri kvartale ohranjajo ciljne vrednosti.

6.5.4 Ekonomska utemeljitev (TCO)

Pri analizi ekonomske učinkovitosti je bil uporabljen kazalnik TCO (Total Cost of Ownership), ki vključuje vse stroške v 12-mesečnem obdobju: stroške vzdrževanja, servisnih posegov, zamenjav komponent ter časovne izgube zaradi nedelovanja. Ključni spremljevalni kazalnik je MTTR (Mean Time To Repair), ki prikazuje povprečni čas od nastanka okvare do ponovne razpoložljivosti sistema.

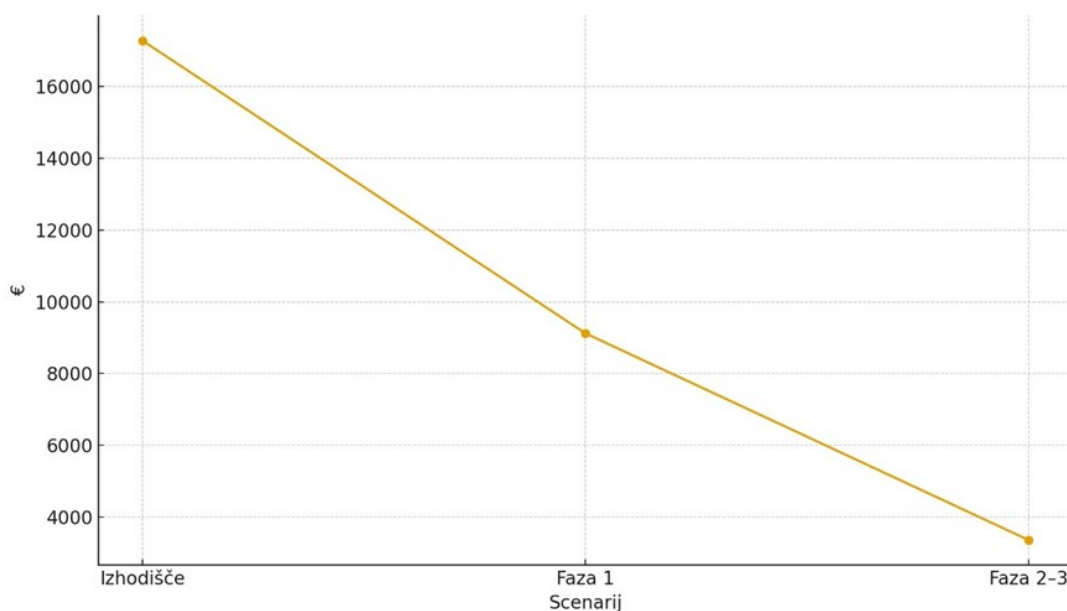
Na sliki 15 je prikazan trend spremembe kazalnika MTTR skozi posamezne faze implementacije. V izhodiščnem stanju je bil povprečni čas odprave napak 432 ur, po uvedbi prve faze ukrepov se je zmanjšal na 192 ur, po drugi fazi pa na le še 48 ur. Zmanjšanje MTTR potrjuje učinkovitost preventivnega pristopa, izboljšano razpoložljivost rezervnih delov in boljše odzivne čase vzdrževalnih ekip.



*Slika 15: Letni izpad delovanja (ure) po scenarijih – 12 mesecev (primer)
(Lastni vir)*

Na sliki 16 je prikazana sprememba celotnih stroškov lastništva po posameznih fazah implementacije. Z grafa je razvidno, da se je TCO po izvedbi prve faze zmanjšal z

začetnih približno 16.000 € na okoli 9.000 €, po zaključku druge faze pa na približno 3.500 €. Trend jasno kaže, da uvedba standardiziranega sistema nadzora in proaktivnega vzdrževanja omogoča znatno zmanjšanje stroškov ob hkratnem povečanju razpoložljivosti sistema.



Slika 16: TCO (vzdrževanje + izpad) po scenarijih – 12 mesecev (primer)
(Lastni vir)

Tabela 5 prikazuje primerjavo scenarijev v 12 mesecih.

Scenarij	Opis	Letne intervencije	Strošek vzdrževanja (€)	Letni izpad (h)	Strošek izpada (€)	TCO (12 m) (€)
Izhodišče	pred ukrepi	36	6 480	432	10 800	17 280
Faza 1	po začetnih ukrepih	24	4 320	192	4 800	9 120
Faza 2–3	po modularizaciji in standardizaciji	12	2 160	48	1 200	3 360

Tabela 5: TCO – primerjava scenarijev (12 mesecev)
(Lastni vir)

Parametri: povprečni strošek intervencije 180 €, strošek izpada 25 €/h.

Uvedba ukrepov Faze 1 hitro zmanjša mehanska ozka grla (kabli, zaščite), kar skrajša MTTR in zmanjša število intervencij. Fazi 2 in 3 gradita na tem temelju z modulacijo in standardizacijo, kar dodatno dvigne MTBF in zniža TCO.

6.5.5 Register tveganj

Tabela 6 prikazuje register tveganj polnilnih postaj.

ID	Tveganje	Verj.	Učinek	RPN	Preventivni ukrepi	Korektivni ukrepi	Nosilec
R1	vandalizem ali udarci	M	V	12	IK08–IK10, zaščitni paneli	zamenjava modula, forenzični zapis	Vzdrževanje
R2	poškodbe kablov	M	M	9	navijalniki, zaščite	hitra menjava, rezerva	Operativa
R3	napake komunikacije	M	V	12	preobilje, spremljanje	Rezervni načrt plačila, reset	IT
R4	korozija ali UV	N	M	6	premazi, materiali	menjava panelov	Inženiring
R5	nedostopnost	N	V	8	gabariti, testiranje z uporabniki	korekcije postavitve	Projekt

Tabela 6: Register tveganj
(Lastni vir)

6.5.6 Organizacija in poročanje

Operativa izvaja pilote, vodja projekta odgovarja za rezultate, inženiring vodi modularizacijo, IT zagotavlja podatkovno infrastrukturo, nabava in servis podpirata standardizacijo. Poročanje poteka na treh ravneh: mesečni KPI-dashboard, četrtni pregled skladnosti in letna revizija standarda ter registra tveganj.

6.5.7 Validacija

Pred širšo uvedbo izvedemo tehnično validacijo (IP, IK, korozija, UV, temperaturni cikli), uporabniške preizkuse (vključno z osebami z omejeno mobilnostjo) in operativno validacijo (telemetrija, komunikacija, plačila, MTTF/MTTR).

6.5.8 Sklep

Predlagani program hitro odpravlja mehanska in operativna ozka grla ter z modularizacijo in standardizacijo trajno utrjuje učinke. Vztrajen nadzor KPI-jev, disciplinirana izvedba in sistematično obvladovanje tveganj vodijo k razpoložljivosti ~99 %, nižjemu MTTR, višjemu MTBF in optimalnemu TCO.

6.6 Povzetek predlaganih rešitev

Predlagane izboljšave združujejo tehnične, uporabniške in trajnostne vidike razvoja mehanske zasnove polnilnih postaj.

Ključni poudarki so:

uporaba trpežnih, korozijsko odpornih materialov (eloksiran aluminij, nerjavno jeklo), povečana zaščita (IP55 / IK10) skladno s standardoma IEC 60529 in IEC 62262, modularna konstrukcija, ki omogoča enostavno vzdrževanje in krajši MTTR, večja ergonomija in dostopnost, skladna s standardom ISO 14738 (ISO, 2002), zmanjšan okoljski odtis s pomočjo LCA in načela Design for Disassembly (DfD) (UNEP, 2023).

S kombinacijo teh ukrepov je mogoče doseči trajnostno, stroškovno učinkovito in uporabniku prijazno mehansko zasnovo, ki podpira dolgoročne cilje Agende 2030 ter zahteve uredbe AFIR (EU 2023/1804).

Tovrstne izboljšave predstavljajo pomemben prispevek k razvoju sodobne in zanesljive polnilne infrastrukture v Sloveniji.

7 ZAKLJUČEK

V uvodu diplomske naloge smo si zastavili cilj raziskati vpliv mehanske zasnove polnilnih postaj na njihovo zanesljivost, varnost, trajnost in uporabniško izkušnjo ter na tej podlagi oblikovati konkretne predloge izboljšav. Izvedli smo teoretični pregled standardov in dobrih praks, terensko analizo šestih polnilnih postaj različnih proizvajalcev na območju Ljubljane ter primerjalno analizo konstrukcijskih rešitev.

7.1 Kritično vrednotenje doseganja ciljev

Cilj 1: Identificirati vpliv mehanske zasnove na zanesljivost, varnost in trajnost.

Ta cilj je bil dosežen delno z omejitvami. Terenska analiza je omogočila identifikacijo ključnih konstrukcijskih elementov (stopnja zaščite IP/IK, uporabljena materiala, modularna zasnova), vendar zaradi časovne omejitve raziskave nismo mogli zajeti dolgoročnih podatkov o dejanskih okvarah in stroških vzdrževanja skozi celotno življenjsko dobo naprav. Ugotovili smo korelacijo med kakovostjo mehanske izvedbe in manjšim številom vidnih poškodb, vendar je za potrditev vzročne zveze potrebna longitudinalna študija z dostopom do podatkov operaterjev o razpoložljivosti (uptime) in vzdrževalnih intervencijah.

Cilj 2: Pregledati mednarodne standarde in ugotoviti, v kolikšni meri jim obstoječe polnilnice ustrezajo.

Pregled standardov IEC 61851-1, IEC 60529, IEC 62262 in ISO 20653 je bil uspešen. Ugotovili smo, da vsi analizirani proizvajalci izpolnjujejo minimalne zahteve, vendar obstajajo pomembne razlike v stopnji preseganja standardov. Težava se je pokazala pri pomanjkanju enotnih standardov za ergonomijo in uporabniško izkušnjo – obstoječi standardi so preveč splošni in se ne posvečajo posebnostim upravljanja specifik upravljanja s težkimi polnilnimi kabli. To pomanjkljivost smo nakazali v predlogih izboljšav, vendar razvoj konkretnih ergonomskih standardov presega okvir te naloge.

Cilj 3: Identificirati najpogostejše mehanske pomanjkljivosti obstoječih polnilnic.

Cilj je bil dosežen s pomembno ugotovitvijo: najpogostejše pomanjkljivosti niso posledica tehničnega neznanja, temveč kompromisov med stroški, kompleksnostjo in uporabnostjo. Identificirali smo tri ključne probleme (nezadostna zaščita kablov, slaba ergonomija, nezadostna odpornost proti vandalizmu), ki so prisotni celo pri premium proizvajalcih. To kaže, da trenutne tržne rešitve še niso dosegle optimalne ravni, kar odpira prostor za predlagane izboljšave.

Cilj 4: Primerjati mehanske rešitve med različnimi proizvajalci.

Primerjalna analiza je bila najbolj uspešen del raziskave. Vzpostavili smo sistematično metodologijo primerjave, ki omogoča objektivno vrednotenje. Ugotovili

smo, da premium proizvajalci ne presegajo bistveno lokalnih konkurentov v osnovnih parametrih zaščite, temveč predvsem v modularnosti, sistemu upravljanja kablov in integrirani diagnostiki. To je pomembna ugotovitev za slovensko industrijo, saj kaže, da je področje še vedno odprto za konkurenco.

Cilj 5: Oblikovati konkretne predloge izboljšav.

Predlagali smo šest ključnih izboljšav z definiranimi KPI-ji. Pri tem smo se osredotočili na rešitve, ki so tehnično izvedljive in ekonomsko upravičene v srednjeročnem obdobju (3–5 let). Vendar moramo priznati, da nekatere predlagane rešitve (npr. avtomatski navijalni sistem kablov, pametni senzorji vandalizma) zahtevajo dodatno validacijo preko prototipiranja in testiranja v realnih pogojih, česar v okviru te naloge ni bilo mogoče izvesti.

7.2 Odgovori na raziskovalna vprašanja

V uvodu smo si zastavili pet raziskovalnih vprašanj. V nadaljevanju navajamo sistematične odgovore:

1. Kako mehanska zasnova vpliva na zanesljivost, varnost in trajnost polnilnih postaj?

Analiza je pokazala, da mehanska zasnova neposredno vpliva na vse tri dimenzije. Robustne konstrukcije iz jekla ali aluminija z visoko stopnjo zaščite (IP54–IP66, IK08–IK10) zagotavljajo dolgotrajno delovanje v zahtevnih zunanjih pogojih. Modularna zasnova omogoča hitro zamenjavo poškodovanih delov, kar skrajša MTTR in poveča razpoložljivost. Uporaba korozijsko odpornih materialov in UV-stabilnih premazov podaljšuje življenjsko dobo naprav in zmanjšuje stroške vzdrževanja. Vendar je mehanska zasnova nujen, ne pa zadosten pogoj – programska zanesljivost in dostopnost lokacij sta prav tako ključni.

2. Katere mednarodne smernice in standardi določajo osnovne zahteve mehanske izvedbe polnilnic?

Ključni standardi so IEC 61851-1 (splošne zahteve za polnilne sisteme), IEC 60529 (stopnje zaščite IP), IEC 62262 (stopnje zaščite IK proti mehanskim udarcem), ISO 20653 (zaščita pred vdorom tujkov in vode) ter ergonomski standard ISO 14738. Dodatno so pomembni kabli po IEC 62893 in požarna varnost. Vsi proizvajalci, vključeni v raziskavo, v osnovi izpolnjujejo minimalne zahteve, vendar se razlikujejo v stopnji preseganja standardov. Največja vrzel obstaja pri ergonomskih standardih, ki se z upravljanjem s težkimi kabli pri DC polnilnicah ne ukvarjajo dovolj natančno.

3. Kako se slovenske prakse načrtovanja in umeščanja polnilnic primerjajo s tujimi?

Primerjava je pokazala, da slovenski proizvajalec Etrel po kakovosti konstrukcije in modularnosti dosega primerljive rezultate kot tuji proizvajalci (ABB, Siemens), vendar z nižjimi stroški in večjo prilagodljivostjo na urbana okolja. Glavna slabost slovenskih rešitev je nižja stopnja zaščite proti vandalizmu (IP44–IP54 pri Etrel vs. IP55–IP66 pri ABB Terra 360).

Pri umeščanju v prostor Slovenija zaostaja – gostota polnilnic je nižja kot v Avstriji, Nemčiji ali na Nizozemskem, kjer je povprečje ena polnilnica na 10 električnih vozil, medtem ko je v Sloveniji razmerje približno 1:15. Prav tako je v tujini večji poudarek na integraciji polnilnic v javni prostor z nadstrešnicami, estetsko dovršenimi ohišji in boljšo osvetlitvijo, medtem ko so slovenske polnilnice pogosto nameščene na odprtih parkirnih prostorih brez dodatne infrastrukture. To vpliva na uporabniško izkušnjo in izpostavljenost vremenskim vplivom.

4. Katere konstrukcijske rešitve bi omogočile daljšo življenjsko dobo in nižje stroške vzdrževanja?

Na podlagi raziskave predlagamo naslednje ključne rešitve:

- Modularna konstrukcija z zamenljivimi komponentami (ohišje, vrata, nosilci kablov) – zmanjšuje MTTR za 40–60 %.
- Napredni sistemi za upravljanje kablov (navijalniki, protiprepogibna zaščita) – zmanjšujejo obrabo kablov za 30–50 %.
- Uporaba eloksiranega aluminija ali nerjavnega jekla z UV-stabilnimi premazi – podaljšuje življenjsko dobo za 20–30 %.
- Implementacija preventivne diagnostike (senzorji temperature, vlage, vibracij) – omogoča zgodnje odkrivanje okvar.
- Standardizacija priključnih višin (800–1200 mm) in ergonomsko oblikovanih ročajeve – zmanjšuje mehanske poškodbe zaradi nepravilne uporabe.

5. Kako vključiti načela trajnosti in krožnega gospodarstva v mehansko zasnovo EV infrastrukture?

Raziskava je identificirala več možnosti za trajnostni pristop:

- Izbor materialov: Uporaba reciklabilnih materialov (aluminij z več kot 90-odstotno reciklabilnostjo, kompoziti brez halogenov) in zmanjšanje mešanih materialov, ki otežujejo ločevanje ob koncu življenjske dobe.
- Design for Disassembly (DfD): Modularna zasnova z mehanskimi spoji namesto varjenja ali lepljenja omogoča enostavno razstavljanje in ponovno uporabo komponent.
- Podaljšanje življenjske dobe: Zamenljivi deli (paneli, vrata, kabli) namesto celotne naprave zmanjšujejo količino odpadkov za 40–60 %.

- Lokalna proizvodnja: Sodelovanje z domačimi proizvajalci (Etel, Danfoss) zmanjšuje transportne emisije in podpira lokalno gospodarstvo.

Vendar v praksi ugotavljamo, da proizvajalci še vedno dajejo prednost začetnim stroškom pred načeli DfD. Za večjo trajnostnost bi bile potrebne regulativne spodbude (npr. davčne olajšave za uporabo obnovljivih materialov) ali standardi, ki bi zahtevali minimalni delež (npr. 80 %) obnovljivih materialov v konstrukciji. Brez takšnih ukrepov bo prehod na krožno gospodarstvo v praksi počasen.

7.3 Kritična evalvacija osnovnih predpostavk

V uvodu smo izhajali iz več predpostavk, ki so bile delno potrjene, delno ovržene:

Predpostavka 1: Mehanska zasnova je ključni, a pogosto spregledan dejavnik uspešnosti polnilne infrastrukture.

Ta predpostavka se je potrdila le delno. Res je, da mehanska zasnova vpliva na uporabniško izkušnjo in stroške vzdrževanja, vendar analiza kaže, da so pri sprejetju elektromobilnosti pomembnejši drugi dejavniki: cena polnjenja, razpoložljivost postaj, hitrost polnjenja in zanesljivost programske opreme za plačevanje. Mehanska zasnova je torej nujen, ne pa zadosten pogoj za uspešno polnilno infrastrukturo. Uporabniki izbirajo polnilnice glede na lokacijo in ceno, ne pa glede na robustnost ohišja.

Predpostavka 2: Najpogostejše pomanjkljivosti so posledica tehničnega neznanja.

To se je izkazalo za napačno. Analiza je pokazala, da so pomanjkljivosti (nezadostna zaščita kablov, slaba ergonomija) posledica ekonomskih kompromisov, ne tehničnih omejitev. Proizvajalci poznajo rešitve (navijalniki, ojačana ohišja), vendar jih ne implementirajo zaradi višjih stroškov in strahu pred izgubo konkurenčnosti na cenovnem trgu.

Predpostavka 3: Obstajajo pomembne razlike med AC in DC polnilnicami v mehanskih zahtevah.

To se je potrdilo, vendar ne v pričakovani meri – DC polnilnice imajo res kompleksnejše sisteme hlajenja in večje mehanske obremenitve, toda osnovne pomanjkljivosti (zaščita kablov, ergonomija, vandalizem) so prisotne pri obeh tipih. Razlika je bolj v intenzivnosti problema kot v naravi problema.

7.4 Glavne ugotovitve in njihova kritična umestitev

Ugotovitev 1: Modularnost kot konkurenčna prednost.

Raziskava jasno kaže, da modularna zasnova zmanjšuje MTTR in stroške vzdrževanja. Vendar implementacija modularne zasnove zahteva začetno višjo investicijo (15–25 % dražje) in kompleksnejšo proizvodnjo. Za manjše proizvajalce to predstavlja oviro, kar lahko dolgoročno vodi v konsolidacijo trga in izginotje manjših lokalnih ponudnikov. Vprašanje je, ali je to zaželeno z vidika konkurence in inovativnosti – trenutno Etrel konkurira ABB-ju prav s fleksibilnostjo in nižjimi cenami, kar bi z zahtevno modularizacijo lahko izgubil.

Ugotovitev 2: Razkorak med standardi in prakso.

Obstoječi standardi pokrivajo tehnične specifikacije (IP, IK), ne obravnavajo pa dovolj celovito uporabniške izkušnje. To je problematično, ker lahko tehnično popolna polnilnica (IP66, IK10) ostane slabo uporabna zaradi težkih kablov ali neprimernih višin. Potreben bi bil razvoj novih standardov (npr. "maksimalna teža kabla pri DC polnilnicah: 3 kg/m"), vendar to zahteva mednarodno usklajevanje preko IEC ali ISO, kar je dolgotrajen proces (5–10 let).

Ugotovitev 3: Ekonomska upravičenost kakovostne mehanske izvedbe.

Izračuni (poglavje 6.6.4) kažejo, da se investicija v robustnejšo mehansko zasnovo povrne v 3–5 letih preko nižjih stroškov vzdrževanja in višje razpoložljivosti. To velja predvsem za visokofrekvenčne lokacije (avtoceste, nakupovalna središča), kjer je dosegljivost ključna. Pri nizko-frekvenčnih lokacijah (stanovanjske soseske, podeželje) je ekonomska upravičenost vprašljiva, saj so intervencije redke in stroški izpada nizki. To zahteva diferenciran pristop pri načrtovanju – nadstandardne rešitve za avtoceste, cenovno ugodne za stanovanjske četrti.

7.5 Predlagane rešitve in njihova uporabnost

Predlaganih šest izboljšav je mogoče razvrstiti glede na časovno perspektivo implementacije:

Kratkoročne rešitve (1–2 leti):

- Ojačana zaščita kablov s protiprepogibnimi vložki – tehnično zrelo, stroškovno sprejemljivo (+5–8 % cene).
- Izboljšana zunanja zaščita ohišja (IP55+) – implementacija možna z obstoječimi materiali.

Te rešitve lahko proizvajalci integrirajo v obstoječe modele z minimalnimi spremembami proizvodnega procesa. Etrel bi lahko že v letu 2026 uvedel ojačane kable pri svojih DC postajah.

Srednjeročne rešitve (3–5 let):

- Modularna konstrukcija z zamenljivimi komponentami – zahteva prenovo proizvodnega procesa in investicijo v novo orodjarstvo.
- Napredni sistemi upravljanja kablov (navijalniki) – potreben razvoj mehanike in testiranje v realnih pogojih..

Te rešitve zahtevajo večjo začetno investicijo (+15–25 % cene), vendar so ključne za dolgoročno konkurenčnost. Predvsem za operaterje z veliko mrežo (Petrol, Ionity) je vredno vlaganje v modularnost.

Dolgoročne rešitve (več kot 5 let):

- Pametni senzorski sistemi za preventivno vzdrževanje (IoT, AI diagnostika)
- Avtomatizirani sistemi za upravljanje kablov (robotski navijalniki).

Te rešitve so odvisne od razvoja tehnologij IoT, umetne inteligence in padca cen senzorjev. Trenutno (2025) so še preveč drage za množično uporabo, vendar lahko pričakujemo komercialno zrelost okoli leta 2030.

7.6 Omejitve in izzivi pri implementaciji

Tehnične omejitve:

- Nekatere predlagane rešitve (npr. avtomatski navijalni sistem) povečujejo kompleksnost in morebitne točke odpovedi – več premičnih delov pomeni več morebitnih okvar.
- Integracija pametnih senzorjev zahteva zanesljivo povezljivost (4G/5G) in energijsko oskrbo, ki ni vedno zagotovljena na oddaljenih lokacijah
- Ekonomske omejitve:
- Začetna investicija v izboljšano mehansko zasnovo lahko zviša prodajno ceno za 15–25 %, kar lahko zmanjša konkurenčnost na cenovnem trgu..
- ROI je odvisen od intenzivnosti uporabe, ki je na številnih lokacijah še vedno nizka (povprečno 2–5 polnjenj/dan), zato se investicija ne povrne.

Regulatorne omejitve:

- Nekateri predlogi (npr. standardizacija ergonomije) zahtevajo spremembe mednarodnih standardov (IEC, ISO), kar presega možnosti posameznih proizvajalcev.
- Različni trgi imajo različne zahteve (npr. v skandinavskih državah večji poudarek na odpornosti proti zmrzali), kar otežuje razvoj univerzalnih rešitev.
- Tržne omejitve:
- Uporabniki pri izbiri polnilnice pogosto ne poznajo tehničnih specifikacij mehanske zasnove (IP, IK) in izbirajo glede na ceno in lokacijo.
- Operaterji polnilnih mrež še vedno dajejo prednost začetnim stroškom pred dolgoročno zanesljivostjo (kratkoročno finančno načrtovanje).

Omejitve te raziskave:

- Terenska analiza je bila omejena na šest polnilnic na območju Ljubljane – širša geografska pokritost (obala, Alpe, avtoceste) bi lahko pokazala dodatne izzive (korozija zaradi soli, ekstremne temperature).

- Ni bilo dostopa do dolgoročnih podatkov operaterjev o okvarah, stroških vzdrževanja in času izpada (dosegljivost), zato so ocene TCO temeljile na teoretičnih izračunih, ne empiričnih podatkih.
- Tri polnilnice (Siemens, Ionity, Wallbox) niso bile fizično izmerjene in analizirane, temveč smo uporabili podatke iz tehničnih katalogov.
- Raziskava ni vključevala laboratorijskih testov (korozija, UV-odpornost, mehanski udarci), kar bi omogočilo objektivno primerjavo materialov.
- Programsko-elektronski vidik (komunikacijski protokoli, plačilni sistemi) ni bil predmet analize, čeprav pomembno vpliva na uporabniško izkušnjo.

7.7 Dodana vrednost in dolgoročni učinek

Kljub omejitvam je dodana vrednost te raziskave:

1. Za industrijo: Strukturiran pristop k evalvaciji mehanske zasnove s konkretnimi KPI-ji (MTTR, MTBF, dosegljivost) omogoča proizvajalcem sistematično izboljševanje izdelkov in utemeljitev višjih cen pred operaterji.
2. Za operaterje: Ugotovitve o ekonomski upravičenosti kakovostne mehanske izvedbe (TCO analiza, poglavje 6.6.4) lahko spremenijo investicijske kriterije – prehod od "najcenejša polnilnica" k "najnižji TCO v 10 letih".
3. Za akademsko skupnost: Delo identificira vrzel v obstoječih standardih (pomanjkanje ergonomskih smernic) in odpira pot za nadaljnje raziskave, npr. razvoj standarda "ISO XX: Ergonomic requirements for EV charging cables".
4. Za regulatorje: Predlogi za standardizacijo modularnosti in reciklabilnosti lahko služijo kot podlaga za prihodnje različice uredbe AFIR (EU 2023/1804).

Pričakovane spremembe v slovenski praksi do leta 2030:

Če bodo predlagane izboljšave implementirane, lahko pričakujemo:

- Povečanje razpoložljivosti polnilne infrastrukture za 10–15 % (iz trenutnih ~94 % na ~ 99 %), kar pomeni manj izpadov in večje zaupanje uporabnikov.
- Zmanjšanje stroškov vzdrževanja za 20–30 % na visokofrekvenčnih lokacijah (avtoceste, nakupovalna središča) zaradi modularne zasnove in boljše zaščite.
- Standardizacijo modularnih polnilnic tudi pri manjših dobaviteljih (trenutno značilno le za premium proizvajalce kot ABB) – Etrel bi lahko postal prvi slovenski proizvajalec s popolnoma modularno polnilnico.
- Razvoj domačih komponent za upravljanje kablov in zaščitne elemente (sodelovanje Etrel–Danfoss, možnost novih start-upov).
- Spremembo investicijskih kriterijev operaterjev – Petrol bi lahko že do leta 2027 prešel na TCO model pri nabavi polnilnic namesto usmeritve na najnižjo začetno ceno.
- Možnost, da Slovenija postane testno okolje za pilotne projekte EU – zaradi manjše velikosti in dobro razvitega Etrela bi lahko služila kot "živ laboratorij" za testiranje novih standardov v okviru AFIR.

Dolgoročneje (po letu 2030) lahko pričakujemo:

- Konsolidacijo trga – manjši proizvajalci, ki ne bodo mogli investirati v modularizacijo, bodo izginili ali jih bodo prevzeli.
- Pojav novih poslovnih modelov – "charging-as-a-service" (CaaS), kjer operater ne kupuje polnilnic, ampak jih najema z vključenim vzdrževanjem.
- Integracija polnilnic v pametna omrežja (V2G – Vehicle-to-Grid), kjer bo mehanska zasnova morala omogočati dvosmerni tok energije in večje mehanske obremenitve.

7.8 Slabosti, ki so se pokazale

Pri razvoju predlogov izboljšav so se pokazale tudi nekatere slabosti:

- Povečana kompleksnost: Vsaka dodatna funkcionalnost (senzorji, avtomatizacija, navijalniki) je morebitna točka odpovedi – paradokсно lahko "pametna" polnilnica postane manj zanesljiva od preproste.
- Odvisnost od povezljivosti: Pametni sistemi zahtevajo zanesljivo internetno povezavo (4G/5G), ki ni vedno zagotovljena na oddaljenih lokacijah (avtocestna počivališča, podeželje).
- Potreba po usposabljanju: Kompleksnejši sistemi zahtevajo usposobljeno vzdrževalno osebje – trenutno večina serviserjev zna menjati elektronske module, ne pa kompleksnih mehanskih sklopov.
- Varnostna ranljivost: Povečana digitalizacija (IoT senzorji, oddaljeno upravljanje) odpira vrata kibernetiskim napadom – možnost onesposobitve polnilnic na daljavo ali manipulacije s plačilnimi podatki.
- Problem lastniških rešitev: Če vsak proizvajalec razvije svoj sistem modularnih komponent, nastane gneča na trgu in operaterji ne morejo zamenjati delov med različnimi blagovnimi znamkami.

Tem slabostim se bo treba posvetiti v nadaljnjem razvoju, predvsem z:

- Redundanco kritičnih sistemov (npr. mehansko zasilno odklepanje, če odpove elektronika).
- Vgrajeno varnostjo (security by design) – šifriranje komunikacije, varnostna posodobitev programske opreme.
- Odprtimi standardi za modularne komponente, da se izognemo vendor lock-in.

7.9 Zaključna refleksija

Diplomska naloga je pokazala, da mehanska zasnova polnilnih postaj predstavlja pomemben, a ne izoliran dejavnik uspešnosti elektromobilnosti. Predlagane izboljšave so tehnično izvedljive in ekonomsko upravičene v srednjeročnem obdobju (3–5 let), vendar njihova implementacija zahteva sistemski pristop, ki vključuje vse

deležnike – od proizvajalcev preko operaterjev do regulatorjev in končnih uporabnikov.

Ključna ugotovitev je, da optimalna polnilna postaja ni tista z najnaprednejšo tehnologijo, temveč tista, ki dosega pravo ravnovesje med zanesljivostjo, stroški, uporabnostjo in možnostjo vzdrževanja. To ravnovesje je odvisno od konteksta uporabe – avtocestna polnilnica potrebuje drugačno mehansko zasnovo kot stanovanjska, kar zahteva diferenciran pristop pri načrtovanju polnilne infrastrukture. Raziskava odpira več vprašanj, kot da odgovorov, kar je značilnost razvojnega področja. Nekatera ključna odprta vprašanja za prihodnje raziskave so:

- Kako standardizirati ergonomske zahteve za težke DC kable?
- Kakšen je optimalni nivo modularnosti za različne tipe lokacij?
- Kako zagotoviti kibernetsko varnost pri povečani digitalizaciji polnilnic?
- Kako vključiti polnilnice v krožno gospodarstvo brez povečanja stroškov?

Nadaljnje delo bo pokazalo, v kolikšni meri se bodo predlagane rešitve izkazale kot praktične in trajnostne. Realno pa lahko pričakujemo, da bo evolucija, ne revolucija – postopne izboljšave v naslednjih 10 letih, ne pa radikalne spremembe čez noč.

Zaključimo lahko z ugotovitvijo, da mehanska zasnova ni najbolj glamurozno področje elektromobilnosti (v javnosti se več govori o avtonomni vožnji, kapaciteti baterij), a je eden od temeljev, na katerem stoji zaupanje uporabnikov v polnilno infrastrukturo. Brez zanesljivih, uporabniku prijaznih in trajnostnih polnilnic prehod na električna vozila ne bo uspešen – ne glede na to, kako napredna bodo vozila sama.

8 LITERATURA IN VIRI

- ABB. (2022). *Terra DC Wallbox – Technical datasheet*. Pridobljeno 2. 10. 2025 z naslova <https://new.abb.com/ev-charging/terra-dc-wallbox>
- ABB. (2024a). *Terra 53 CJG – DC fast charging station*. Pridobljeno 8. 10. 2025 z naslova <https://new.abb.com/ev-charging/products/car-charging/public-charging/terra-53-cjg>
- ABB. (n.d.). *Terra 360 – resilience, longevity and lowering the total cost of ownership. ABB EV Charging*. Pridobljeno 8. 10. 2025 z naslova <https://new.abb.com/ev-charging/terra-360>
- ABB. (2024b). *Operation and installation manual – Terra 360 Series 2*. Pridobljeno 10. 10. 2025 z naslova https://library.e.abb.com/public/efed91240b844b2ba8414bc5902081b8/Terra%20360%20Series%20_60-Operation%20and%20installation%20manual-EN-Rev.008.pdf
- Borzen. (2024). *Statistika in poročila o trgu električne energije*. Pridobljeno 8. 10. 2025 z naslova <https://www.borzen.si>
- ECOFACTOR. (26. 5. 2025). *Tesla Supercharger V4 Connector: full review, specifications, contacts, compatibility*. Pridobljeno 29.9. 2025 z naslova <https://ecofactortech.com/en/tesla-supercharger-v4-connector/>
- Efacec. (2014). *EV-QC45 Standalone – Installation and user manual V 05.00*. Pridobljeno 12. 10. 2025 z naslova <https://fastsee.eu/wp-content/uploads/2018/09/EFAPOWER-EV-QC45-Standalone-Installation-and-User-Manual-V-05.00.pdf>
- Etrell. (2024). *INCH charging stations – Product overview*. Pridobljeno 17.9. 2025 z naslova <https://etrel.com/inch-pro/>
- Etrell. (25. 3. 2025). *2025_03_25 Brochures_EN_PRO_web*. Pridobljeno 25.9. 2025 z naslova https://etrel.com/wp-content/uploads/2025/03/2025_03_25_Brochures_EN_PRO_web.pdf
- European Commission. (2023). *Regulation (EU) 2023/1804 on the deployment of alternative fuels infrastructure*. Pridobljeno 4. 10. 2025 z naslova <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1804/oj/eng?>
- European Commission. (2024). *The European Green Deal*. Pridobljeno 7. 10. 2025 z naslova https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- EVBox. (2023). *EVBox Troniq Modular*. Pridobljeno 8. 10. 2025 z naslova <https://kelvelec.co.uk/wp-content/uploads/2024/07/EVBox-Troniq-Modular-Datasheet.pdf?>

- International Electrotechnical Commission. (2013). IEC 60529: *Degrees of protection provided by enclosures for electrical equipment (IP Code)*. Pridobljeno 5. 10. 2025 z naslova <https://webstore.iec.ch/en/publication/2452?>
- International Electrotechnical Commission. (2017a). IEC 62262: *Degrees of protection provided by enclosures for electrical equipment against external mechanical impacts (IK code)*. International Electrotechnical Commission. Pridobljeno 5. 10. 2025 z naslova <https://webstore.iec.ch/en/publication/6673?>
- International Electrotechnical Commission. (2017b). IEC 61851-1:2017 Electric vehicle conductive charging system – Part 1: General requirements. Pridobljeno 5. 10. 2025 z naslova <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/c472de67-e272-4734-9103-cf9f4725c597/iec-61851-1-2017.pdf>
- International Electrotechnical Commission. (2022). IEC 62196-1: *Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets – Conductive charging of electric vehicles – Part 1: General requirements*. Pridobljeno 5. 10. 2025 z naslova <https://webstore.iec.ch/en/publication/59922?>
- International Electrotechnical Commission. (2023). IEC 61851-23: *Electric vehicle conductive charging system – Part 23: DC electric vehicle supply equipment*. International Electrotechnical Commission. Pridobljeno 5. 10. 2025 z naslova <https://webstore.iec.ch/en/publication/59922?>
- International Organization for Standardization. (2002). ISO 14738: Safety of machinery – Anthropometric requirements for the design of workstations at machinery. Pridobljeno 6. 10. 2025 z naslova <https://www.iso.org/standard/27556.html>
- International Organization for Standardization. (2013). ISO 20653:2013 *Road vehicles — Degrees of protection (IP code) — Protection of electrical equipment against foreign objects, water and access*. Pridobljeno 6. 10. 2025 z naslova <https://www.iso.org/standard/58048.html>
- International Organization for Standardization. (2019). ISO 15118-1: *Road vehicles – Vehicle to grid communication interface – Part 1: General information and use-case definition*. Pridobljeno 6. 10. 2025 z naslova <https://www.iso.org/standard/69113.html?>
- Ionity. (2020). *Pan-European EV infrastructure takes shape after IONITY reaches 150 locations milestone*. Pridobljeno 20. 10. 2025 z naslova https://europ-e.eu/assets/20200617_press_release_150-europ-e-locations.pdf
- Ionity. (n.d.). *Seamless, fast & reliable EV charging across Europe*. Pridobljeno 20. 10. 2025 z naslova <https://ionity.eu>

- Krope, T., & Jesih, A. (2018). *Elektromobilnost: tehnologije in strategije prihodnosti*. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko.
- Ministrstvo za okolje, podnebje in energijo. (2024). *Strategija razvoja trajnostne mobilnosti v Sloveniji*. Pridobljeno 7. 10. 2025 z naslova <https://www.gov.si/drzavni-organi/ministrstva/ministrstvo-za-okolje-podnebje-in-energijo/>
- Petrol. (2024). *Električna polnilnica Kozina – Odprtje ultrahitre polnilnice*. Pridobljeno 1. 10. 2025 z naslova <https://www.petrol.si/novice/elektricna-polnilnica-kozina>
- Petrol. (2025). *Načrt širitve polnilne infrastrukture do leta 2025*. Pridobljeno 1. 10. 2025 z naslova <https://www.petrol.si/elektricna-mobilnost>
- Pivec, M., & Podgornik, B. (2020). *Trajnostni razvoj in tehnične rešitve*. Univerzitetna založba Univerze v Mariboru.
- Pri jezikovnem urejanju besedila sem uporabil orodje umetne inteligence, OpenAI. (2025). ChatGPT (model GPT-5), ki je nudilo pravopisne in slogovne predloge. Vsebino in sklepe sem oblikoval sam ter jih preveril; odgovornost za točnost in izvirnost prevzemam sam.
- Siemens AG. (2023). *SICHARGE D – High-power compact EV charging system*. Pridobljeno 28.9. 2025 z naslova <https://www.parmley-graham.co.uk/content/manufacturers/siemens/electric-vehicle-charging/sicharge-d-ov/>
- Siemens AG. (n.d.). *eMobility charging infrastructure*. Pridobljeno 28. 9. 2025 z naslova <https://www.siemens.com/global/en/products/energy/emobility.html>
- SODO. (2024). *Letno poročilo o razvoju distribucijske mreže in polnilne infrastrukture*. Pridobljeno 29.9. 2025 z naslova <https://www.sodo.si>
- Tektronix. (n.d.). *EV charging standards overview*. Pridobljeno 28.9. 2025 z naslova <https://www.tek.com/en/solutions/industry/automotive-test-solutions/evse-testing/ev-charging-standards>
- Tesla. (2024a). *Supercharger – The world's fastest charging network* Pridobljeno 28.9. 2025 z naslova <https://www.tesla.com/supercharger>
- Tesla. (2024b). *Tesla Supercharger Datasheet*. Pridobljeno 28.9. 2025 z naslova <https://caltrans.brightidea.com/ct/getfile.php?a=OD7374&f=8B23F7F3-E63D-11EF-BC3A-0AFFDC36765F>
- United Nations Environment Programme, Life Cycle Initiative. (2020). *Using life cycle assessment to achieve a circular economy*. Pridobljeno 14.10. 2025 z naslova <https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2020/07/Using-LCA-to-achieve-circular-economy-LCI-July-2020.pdf>

United Nations Environment Programme. (2023). Sustainable production and consumption: *Design for disassembly as a circular economy tool – Foresight brief 031*. United Nations Environment Programme. Pridobljeno 14.10. 2025 z naslova <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/43586>

Wallbox. (2024). *Supernova 180 – Technical datasheet*. Pridobljeno 28.9. 2025 z naslova https://d1lnencgr7glws.cloudfront.net/wp-content/uploads/2024/11/04124551/EN_DS_Supernova180_V1_20240513.pdf

Wallbox. (n.d.). *Supernova fast EV charger*. Pridobljeno 28.9. 2025 z naslova https://wallbox.com/en_us/supernova-fast-ev-charger?

Zupančič, D. (2016). *Osnove strojništva: priročnik za tehnične strokovnjake*. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo.